

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

**“ESTUDO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO E DESENVOLVIMENTO DE
UM DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO EFETIVA DE MOTORES OPERANDO EM
CONDIÇÕES ANORMAIS: ROTOR BLOQUEADO E FALTA DE FASE”**

Dissertação submetida à
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Para a obtenção do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

FÁBIO GONÇALVES GONÇALEZ

Florianópolis, fevereiro de 2007.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

“ESTUDO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO E DESENVOLVIMENTO DE UM
DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO EFETIVA DE MOTORES OPERANDO EM CONDIÇÕES
ANORMAIS: ROTOR BLOQUEADO E FALTA DE FASE”

FÁBIO GONÇALVES GONÇALEZ

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA
sendo aprovada em sua forma final.

Prof. Carlos Alberto Martin, Dr.Ing. - Orientador

Prof. Fernando Cabral, Ph.D. - Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr.Ing. - Presidente

Prof. Marco Antônio Martins Cavaco, Ph.D.

Prof. Hari Bruno Mohr, Dr.Eng.

Prof. Nestor Roqueiro, D.Sc.

*It is not the strongest species
that survive nor the most intelligent,
but the ones most responsive to change.*

Charles Darwin

I Sumário

I	Sumário.....	v
II	Índice de figuras	vii
III	Índice de tabelas	x
IV	Resumo	xi
V	Abstract.....	xii
1	Introdução.....	1
1.1	Objetivos e contribuições	4
1.2	Revisão bibliográfica preliminar	5
1.2.1	Rotor bloqueado ou falha de aceleração.....	6
1.2.2	Desbalanceamento	7
1.2.3	Falta de fase	9
1.3	Dispositivos de proteção.....	11
1.3.1	Relé de sobrecarga térmico	11
1.3.2	Relé de sobrecarga eletrônico.....	13
2	Detalhamento do trabalho.....	14
3	Motores elétricos	18
3.1	Motor de indução.....	18
3.1.1	Motor de indução trifásico.....	18
3.1.2	Campo girante	19
3.2	Vida do motor elétrico.....	21
3.3	Classe de isolamento	22
4	Análise dos efeitos térmicos em motores elétricos.....	24
4.1	Dissipação de calor.....	24
4.2	Temperatura ambiente	26
4.3	Elevação de temperatura.....	26
4.4	Medição da temperatura dos enrolamentos	26
5	Condições anormais de operação dos motores elétricos	29
5.1	Rotor bloqueado ou tempo de aceleração.....	31
5.2	Falta de fase.....	31
6	Cálculo de tempo máximo permitido de motores operando em condições anormais	36
6.1	Tempo máximo permitido para rotor bloqueado	36
6.2	Tempo máximo permitido para falta de fase	36
6.3	Cálculo do tempo máximo permitido em falta de fase.....	40
6.3.1	Motor de indução trifásico conectado em delta.....	40
6.3.2	Calculo da elevação de temperatura	45
6.3.3	Cálculo teórico do tempo máximo permitido em falta de fase.....	46
7	Estudo do dispositivo de proteção contra falta de fase.....	51
7.1	Relés de sobrecarga	51
7.2	Proteção de motor com relés de sobrecarga térmico	51
7.2.1	Relés de sobrecarga térmico sem sensibilidade a falta de fase.....	51
7.2.2	Relés de sobrecarga térmico com sensibilidade a falta de fase	53
7.2.3	Funcionamento do mecanismo diferencial – sensibilidade à falta de fase.....	54

8	Aparelhagem experimental.....	56
8.1	Motor de indução trifásico.....	56
8.2	Relé de sobrecarga térmico	57
8.3	Materiais usados nos testes experimentais	60
8.3.1	Motor de indução trifásico, 4 pólos de 11kW em 380V 60Hz.....	60
8.3.2	Bancada de teste de motores.....	61
8.3.3	Osciloscópio digital	61
8.3.4	Termopares	61
8.3.5	Microcomputador	62
8.3.6	Multímetro digital.....	62
8.3.7	Relé de sobrecarga térmico	63
8.3.8	Fonte de corrente	63
8.3.9	Máquina de teste de calibração.....	64
8.3.10	Microcomputador	65
9	Testes experimentais e resultados	66
9.1	Determinação das curvas características do relé de sobrecarga térmico	66
9.2	Testes de elevação de temperatura do motor de indução trifásico	72
9.2.1	Teste de elevação de temperatura do motor operando sob condição normal ...	73
9.2.2	Teste de elevação de temperatura do motor operando sob condição de rotor bloqueado	76
9.2.3	Teste de elevação de temperatura do motor operando sob condição de falta de fase e 100% de carga	78
9.2.4	Teste de elevação de temperatura do motor operando sob condição de falta de fase e 60% de carga	81
9.2.5	Teste de elevação de temperatura do motor partindo sob condição de falta de fase	84
9.3	Discussões sobre os resultados dos testes	85
10	Proposta de um novo sistema de proteção de motores	87
10.1	Proteção de motor realizada pelo relé de sobrecarga eletrônico	87
10.2	Definição do dispositivo – arranjo dos subsistemas.....	88
10.2.1	Sistema de medição de corrente	90
10.2.2	Detecção de desbalanceamento	91
10.3	Circuito eletrônico	95
10.4	Simulação do circuito eletrônico em P-Spice.....	97
10.5	Desenvolvimento de protótipo e validação da simulação	100
11	Conclusões e resultados.....	107
12	Referência bibliográfica	109
13	Anexo	111

II Índice de figuras

Figura 1 – Principais fatores de danos nos motores elétricos.....	1
Figura 2 – Estrutura básica do estudo.....	3
Figura 3 – Corrente de partida e tempo de rotor bloqueado.....	6
Figura 4 – Limites de variações e de frequência em funcionamento	7
Figura 5 – Aumento de temperatura e perdas versus % de desbalanceamento	9
Figura 6 - Temperatura do enrolamento mais quente, referido à temperatura nominal em condições de funcionamento do motor perante falta de uma fase.....	11
Figura 7 – Princípio de operação do relé de sobrecarga térmico.....	12
Figura 8 – Curva característica tripolar do relé de sobrecarga para condição normal de partida (valores médios)	12
Figura 9 – Estrutura de investigação (parte 1).....	16
Figura 10 – Estrutura de investigação (parte 2).....	17
Figura 11 – Estrutura básica do motor elétrico.....	19
Figura 12 – Campo girante	20
Figura 13 – Ciclo completo de um sistema balanceado.....	20
Figura 14 – Soma gráfica dos campos H	21
Figura 15 – Avaliação de vida para sistemas de isolamento.....	23
Figura 16 – Fatores para uma eficiente dissipação de calor	24
Figura 17 – Dissipação de calor do motor	25
Figura 18 – Relação entre temperatura e resistência ôhmica	27
Figura 19 – Curva típica de limite térmico de um motor de indução trifásico.....	29
Figura 20 – Comportamento do motor sob condição de falta de fase	32
Figura 21 – Curvas tempo versus corrente para relés e motores	34
Figura 22 – Circuito equivalente do motor de indução	37
Figura 23 – Motor de indução trifásico conectado em delta com uma fase desconectada.....	37
Figura 24 - Motor de indução trifásico conectado em estrela com uma fase desconectada.....	38
Figura 25 – Circuito equivalente do motor de indução trifásico conectado em delta e com uma fase desconectada	38
Figura 26 – Circuito equivalente do motor de indução trifásico conectado em estrela e com uma fase desconectada.....	39
Figura 27 – Circuito equivalente do motor de indução trifásico conectado em delta e com uma fase desconectada	40

Figura 28 – Elevação de temperatura do motor de indução trifásico em condição normal e após a falta de fase.....	46
Figura 29 – Curvas características do relé de sobrecarga térmico tripolar.....	53
Figura 30 – Funcionamento do mecanismo diferencial do relé de sobrecarga térmico com sensibilidade a falta de fase	55
Figura 31 – Motor de indução trifásico – 11kW 380V 60Hz.....	57
Figura 32 – Relé de sobrecarga térmico – linha RW27D.....	59
Figura 33 – Posição de instalação dos termopares	61
Figura 34 – Instalação dos termopares no motor de 11kW	62
Figura 35 – Microcomputador e materiais de medição	62
Figura 36 – Bancada de testes de motores e osciloscópio LR8100.....	63
Figura 37 – Fonte de corrente.....	64
Figura 38 – Máquina de teste de calibração e microcomputador	64
Figura 39 – Software de aquisição de dados dos tempos de disparo.....	65
Figura 40 – Curvas características tripolar do RW27D-23 – tempo vs corrente.....	68
Figura 41 – Curvas características bipolar do RW27D-23 – tempo vs corrente	71
Figura 42 – Curvas características media de disparo do RW27D-23 – tempo vs corrente	72
Figura 43 – Medições de temperaturas máximas do motor de indução 11kW 380V 60Hz sob condição normal	74
Figura 44 - Medições de temperaturas máximas do motor de indução 11kW 380V 60Hz sob condição normal	74
Figura 45 – Elevação de temperatura máxima do motor de indução 11kW 380V 60Hz sob condição normal	76
Figura 46 – Medição das temperaturas máximas do motor de indução de 11kW operando com rotor bloqueado.....	77
Figura 47 – Medição das temperaturas máximas do motor de indução de 11kW operando em falta de fase.....	79
Figura 48 – Região de transição do motor de indução de 11kW operando com falta de fase..	80
Figura 49 – Medição das temperaturas máximas do motor de indução de 11kW operando em falta de fase e 60% de carga mecânica	82
Figura 50 – Região de transição do motor de indução de 11kW operando com falta de fase e 60% de carga mecânica	83
Figura 51 – Medição das temperaturas máximas do motor de indução de 11kW partindo com falta de fase.....	84
Figura 52 – Vantagens do relé eletrônico comparado com relé de sobrecarga térmico	88

Figura 53 – Estrutura simplificada do relé de sobrecarga eletrônico e suas interfaces internas	89
Figura 54 – Ponte retificadora com medição por resistor único.....	90
Figura 55 – Ponte retificadora com medição por múltiplos resistores	91
Figura 56 – Circuito de comparação fase - fase	92
Figura 57 – Circuito de comparação fase - média	92
Figura 58 – Circuito de comparação instantânea de pico.....	93
Figura 59 – Escolha dos sistemas do relé de sobrecarga eletrônico.....	94
Figura 60 – Estrutura principal do sistema de medição e detecção de desbalanceamento.....	94
Figura 61 – Circuitos de medição e de detecção de desbalanceamento do relé de sobrecarga eletrônico	96
Figura 62 – Sinais M_6 , M_2 , M_{10} e M_{11} do relé de sobrecarga eletrônico operando sob condição normal.....	97
Figura 63 – Sinais M_6 , M_2 , M_{10} e M_{11} do relé de sobrecarga eletrônico operando sob condição de desbalanceamento	98
Figura 64 – Sinais M_6 , M_2 , M_{10} and M_{11} do relé de sobrecarga eletrônico operando sob condição de falta de fase.....	99
Figura 65 – Protótipo da placa de circuito impresso	100
Figura 66 – Protótipo do sistema de medição e atuador.....	101
Figura 67 – Montagem completa dos testes no protótipo.....	101
Figura 68 – Sinais M_6 , M_2 , M_{10} e M_{11} do relé de sobrecarga eletrônico operando sob condição normal.....	102
Figura 69 – Comparação entre a simulação com P-Spice e o protótipo sob condição normal	103
Figura 70 – Sinais M_6 , M_2 , M_{10} e M_{11} do relé de sobrecarga eletrônico operando sob condição de desbalanceamento	103
Figura 71 – Comparação entre a simulação com P-Spice e o protótipo sob condição de desbalanceamento	104
Figura 72 – Sinais M_6 , M_2 , M_{10} e M_{11} do relé de sobrecarga eletrônico operando sob condição de falta de fase	105
Figura 73 – Comparação entre a simulação com P-Spice e o protótipo sob condição de falta de fase.....	105

III Índice de tabelas

Tabela 1 – Classes de isolamento	2
Tabela 2 – Comparativo entre sistemas de proteção de motores sob condição anormal de operação.....	5
Tabela 3 – Temperatura admissível do ponto mais quente por classe de isolamento	28
Tabela 4 – Principais especificações elétricas e mecânicas do motor de indução trifásico de 11kW 380V 60Hz.....	48
Tabela 5 – Visão geral do relé de sobrecarga térmico.....	51
Tabela 6 – Todos os pólos carregados igualmente	52
Tabela 7 – Apenas dois pólos carregados.....	52
Tabela 8 – Relé de sobrecarga com sensibilidade a falta de fase com pólos carregados não igualmente	52
Tabela 9 – Divisão das faixas de ajuste dos relés de sobrecarga térmico	58
Tabela 10 – Critério de seleção do relé de sobrecarga	59
Tabela 11 – Limites de operação do relé de sobrecarga classe 10 quando todos os pólos são energizados	66
Tabela 12 – Correntes de teste tripolar.....	67
Tabela 13 – Limites de operação do relé de sobrecarga classe 10 quando apenas dois pólos são energizados.....	69
Tabela 14 – Correntes de teste bipolar	69
Tabela 15 – Medições da elevação de temperatura do motor de indução 11kW 380V 60Hz sob condição normal	73
Tabela 16 – Resultados obtidos do teste de rotor bloqueado	78
Tabela 17 – Resultados obtidos do teste de falta de fase com 100% carga.....	80
Tabela 18 – Resultados obtidos do teste de falta de fase com 60% carga.....	83
Tabela 19 – Resultados obtidos do teste de partida do motor com falta de fase.....	85
Tabela 20 – Visão geral do relé de sobrecarga eletrônico.....	87
Tabela 21 – Comparação entre o relé de sobrecarga térmico e eletrônico	106

IV Resumo

Motores de indução são máquinas robustas, de construção relativamente simples e com vida depende quase exclusivamente da vida da isolação dos enrolamentos. Esta, por sua vez, é afetada por muitos fatores onde o mais importante é sem dúvida a temperatura de trabalho dos materiais isolantes utilizados. Devido a isso, para a proteção dos motores, eles devem ser protegidos contra aumentos de temperatura por um dispositivo integrante do motor ou um dispositivo de proteção independente em todas as condições de operação.

O relé de sobrecarga térmico com sensibilidade a falta de fase, que opera pelo princípio dos bimetais, é o dispositivo de proteção independente mais utilizado para proteção térmica de motores. Testes experimentais para avaliação da proteção efetiva realizada por esse dispositivo em condições de operação anormais do motor de indução, rotor bloqueado e falta de fase, foram realizados e com base nas avaliações e resultados obtidos, um novo sistema de proteção é proposto de forma a oferecer proteção efetiva as mais diversas condições de operação do motor.

A validação e implementação do sistema proposto são realizadas através de simulações com auxílio do software *P-Spice* e testes experimentais em protótipo.

V Abstract

The induction motors are robust machines and quite simple in their construction. In general, their lifetime depends on the life of the winding isolation. This is affected by many factors like vibrations, corrosive environments and others. Undoubtedly, among all these factors, the most important is the working temperature of the used insulating materials. Due of this, induction motors must be protected against temperature rise by a protective device, which is a part of the motor or an independent protective device, during all operation conditions.

Overload relay with single phasing failure sensitivity, which achieved using the bimetal principle, is the most used independent protective device for thermal motor protection. Experimental tests were made to evaluate the effective motor protection by this device under abnormal motor operation conditions, blocked rotor and single phasing. Based on results and evaluations found, a new protective system was proposed in order to provide effective protection under several motor operation conditions: normal and abnormal conditions.

The validity and implementation of proposed system were made thought simulations, assisted by *P-Spice* software, and experimental tests using a prototype.

1 Introdução

Os motores de indução são máquinas robustas e de construção relativamente simples, a sua vida depende quase exclusivamente da vida da isolação dos enrolamentos. Esta é afetada por muitos fatores, como, vibrações, ambientes corrosivos entre outros, conforme Figura 1. Dentre todos os fatores, os mais importantes são sem dúvida os fatores que afetam a temperatura de trabalho dos materiais isolantes empregados no motor.



Figura 1 – Principais fatores de danos nos motores elétricos

Quando se fala em redução da vida útil do motor, não se refere às temperaturas elevadas quando os isolantes se queimam e o enrolamento é destruído. Vida útil da isolação (em termos de temperatura de trabalho, bem abaixo daquela em que o material se queima), refere-se ao envelhecimento gradual do isolante, que vai se tornando ressecado, perdendo a capacidade de isolação, até que não suporte mais a tensão aplicada e entra em curto-circuito.

A experiência mostra que a isolação tem uma duração praticamente ilimitada se sua temperatura for mantida abaixo de certo limite. Acima deste valor, a vida útil da isolação vai se tornando mais curta, à medida que a temperatura de trabalho é mais alta [3]. Este limite de temperatura é muito mais baixo que a temperatura de “queima” do isolante e depende do tipo de material empregado.

Esta limitação de temperatura se refere ao ponto mais quente da isolação e não necessariamente ao enrolamento todo. Evidentemente, basta apenas um ponto fraco no interior da bobina para que o enrolamento fique inutilizado.

O limite de temperatura do motor depende do tipo de material empregado. Para fins de normalização, os materiais isolantes e os sistemas de isolamento (cada um formado pela combinação de vários materiais) são agrupados em classes de isolamento, para qual é definida pelo respectivo limite de temperatura, ou seja, pela maior temperatura que o material pode suportar continuamente sem que seja afetada sua vida útil. As classes de isolação utilizadas em máquinas elétricas e os respectivos limites de temperatura conforme NBR-7094 são mostrados a seguir [2]:

Classe de isolamento	Temperatura (°C)
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180

Tabela 1 – Classes de isolação

As classes B e F são comumente utilizadas em motores trifásicos de indução padrões.

As condições de operação dos motores podem ser classificadas como condições normais e anormais. Sob condição normal, o motor opera dentro de seus limites especificados, já sob condições anormais, o motor opera fora dos valores limites especificados (tensão, frequência, rotação, carga, outros). Exemplos de condições de operações anormais são: rotor bloqueado, desbalanceamento e falta de fase (caso particular e extremo de desbalanceamento).

Com base no exposto, pode-se dizer que motores operando em regime contínuo (S1) devem ser protegidos contra aumentos de temperatura por um dispositivo integrante do motor ou um dispositivo de proteção independente. Os tipos de dispositivos a serem utilizados são determinados em função da classe de isolamento empregado.

Comumente, apenas a operação do motor em condição normal é considerada para o dimensionamento adequado do dispositivo de proteção. Embora, os motores também estejam sujeitos a operar em condições anormais. A maioria das condições anormais não são condições momentâneas e os motores devem ser desligados assim que identificada a condição de falha.

A opção de apenas proteger o motor operando em condição normal é uma decisão com base financeira no momento do projeto da instalação e não são considerados ou analisados futuros gastos com rebobinagem de motores, perdas por tempo de parada de máquina e outros, quando o motor falha por causa da operação sob condição anormal além dos limites do motor.

Para a proteção do motor operando em condição normal, os relés de sobrecarga térmico são os dispositivos de proteção contra sobre-aquecimentos mais comuns e praticamente utilizados como padrão atualmente.

Esse trabalho estudará a proteção do motor elétrico conforme itens sombreados na Figura 2.

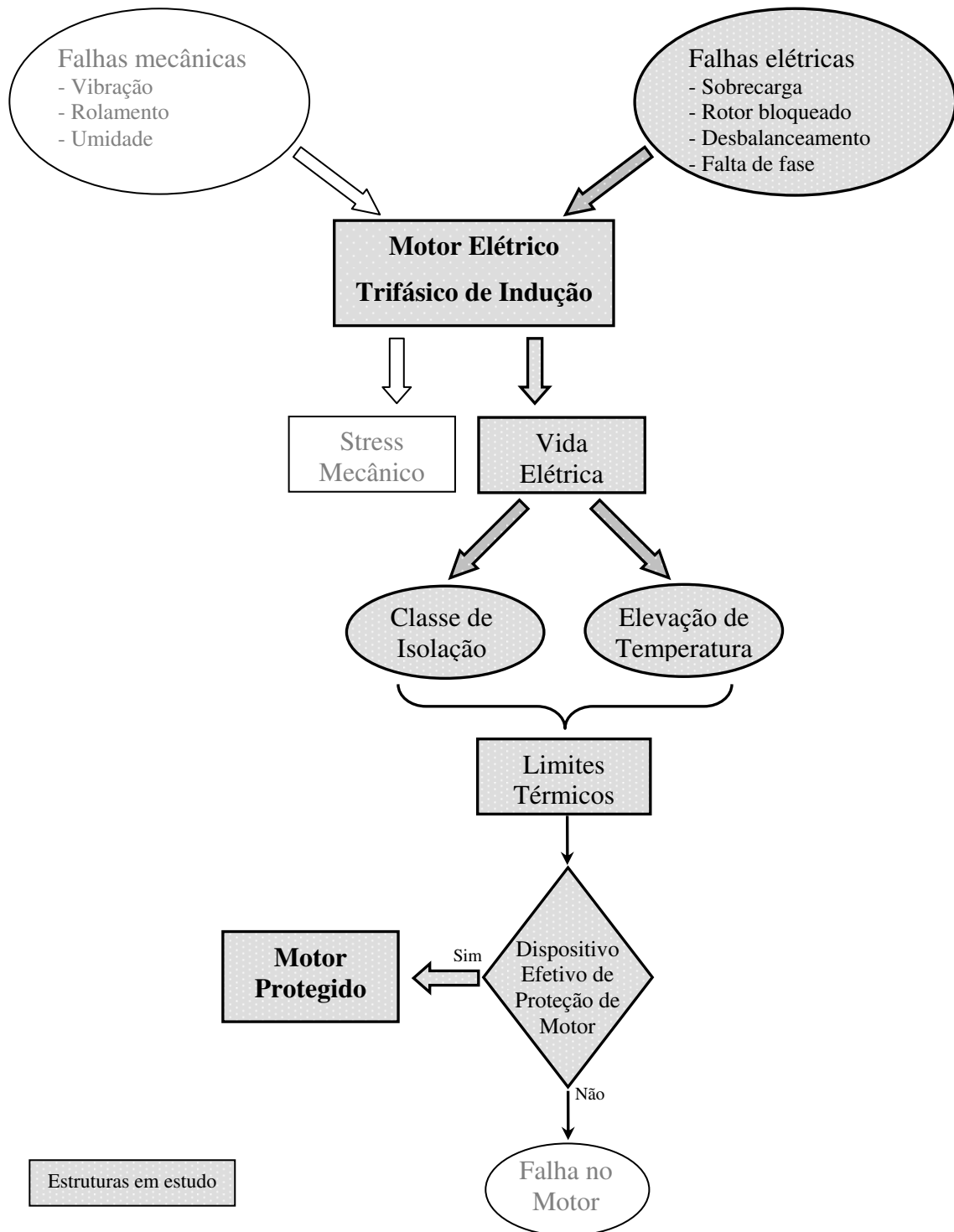


Figura 2 – Estrutura básica do estudo

A condições de operação anormais do motor de indução também podem causar um aumento de temperatura elevado e conseqüentemente a “queima” dos enrolamentos do motor. A seguir são apresentadas algumas dessas condições anormais, tais como:

- Rotor bloqueado;
- Desbalanceamento e
- Falta de fase (caso particular de desbalanceamento).

Logo, para proteção efetiva dos motores trifásicos de indução operando sob condições de rotor bloqueado e falta de fase, é necessário um dispositivo com essas funções de proteção e é o que se objetiva estudar nesse trabalho.

1.1 Objetivos e contribuições

O presente trabalho de pesquisa tem como objetivos principais à avaliação do desempenho dos dispositivos de proteção de motores trifásicos de indução, operando em regime contínuo (S1), que possuem características de proteção contra rotor bloqueado, e sensibilidade à falta de fase. Outro objetivo da dissertação é propor melhorias para os dispositivos de proteção de modo que protejam os motores elétricos de modo efetivo e criar um embasamento teórico para auxiliar no desenvolvimento de novos dispositivos para a proteção de motores contra rotor bloqueado, desbalanceamento e falta de fase.

Para isto, serão realizados estudos e análises do comportamento dos motores de indução trifásico em regime contínuo quando submetidos a operação em condições anormais de rotor bloqueado e falta de fase e suas exigências requeridas por norma.

Uma melhor compreensão das características requeridas para os dispositivos de proteção bem como o comportamento dos motores de indução trifásico pode ser brevemente vistas a partir da revisão bibliográfica preliminar, apresentada a seguir.

1.2 Revisão bibliográfica preliminar

Os sistemas de proteção de motores são constituídos por dispositivos independentes do motor, com funções de seccionamento, comando, proteção térmica e magnética e estabelecidos pela norma brasileira de instalações elétricas de baixa tensão – NBR5410.

Os dispositivos de proteção mais difundidos e utilizados são os fusíveis e os relés de sobrecarga térmico, bem como os disjuntores e os disjuntores-motores. Um comparativo entre os sistemas de proteção de motores é apresentado na Tabela 2, mostrando a condição de proteção do motor operando nas condições anormais mais frequentes e que podem causar danos aos motores de indução [4].

Causas de sobre-aquecimento	Proteção em função da corrente		Proteção com sondas térmicas no motor
	Fusível	Fusível e protetor térmico	
Sobrecarga com corrente 1,2 vezes a corrente nominal	○	●	●
Rotor bloqueado	◐	●	●
Falta de fase	○	◐	●
Variação de tensão excessiva	○	◐	●

Tabela 2 – Comparativo entre sistemas de proteção de motores sob condição anormal de operação

Legenda:

- Não protegido
- ◐ Parcialmente protegido
- Protegido efetivamente

Os estudos e utilizações de dispositivos de proteção térmica contra sobrecargas são bem difundidos, contudo o interesse pelos efeitos de desbalanceamento de tensão, falta de fase em motores de indução trifásico tem se desenvolvido muito juntamente com a utilização

maior de motores de grandes potências. Esse crescimento tem justificado os altos investimentos em proteção [7]. As tecnologias atuais de motores requerem proteções mais sofisticadas, que em contra partida necessitam de análises mais complexas de soluções completas de proteção total.

Para isto, descreve-se a seguir sucintamente cada uma das condições de operação anormais que prejudicam termicamente o motor de indução trifásico de baixa tensão.

1.2.1 Rotor bloqueado ou falha de aceleração

A falha na aceleração de um motor quando seu estator esta energizado pode ser causada por diversos fatores, incluindo falha mecânica do motor, falha de alimentação de tensão ou a abertura de uma das fases de alimentação. Na partida com 100% de carga, tipicamente as correntes nos enrolamentos do estator variam de 3 a 7 vezes a corrente nominal I_n , dependendo do projeto do motor. O dispositivo de manobra deve ser capaz de interromper a corrente de rotor-bloqueado do circuito que ele esta manobrando. A Figura 3 [1] apresenta um exemplo de corrente de partida e tempo de rotor bloqueado.

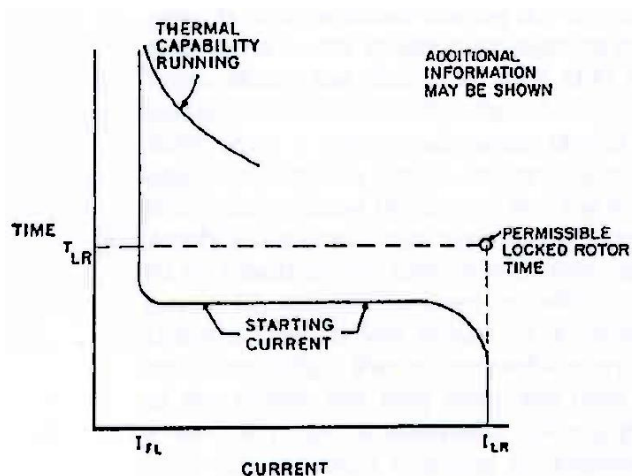


Figura 3 – Corrente de partida e tempo de rotor bloqueado

Outro fato que deve se levar em consideração na condição de rotor bloqueado é que o aquecimento nos enrolamentos do estator é da ordem de 10 a 50 vezes aos da sua condição nominal e os enrolamentos estão sem o benefício da ventilação natural produzida pela rotação do rotor. O aumento de temperatura dos enrolamentos é proporcional ao quadrado da corrente multiplicado pelo tempo ($\Delta t \propto I^2 t$).

Para propiciar uma completa proteção contra a condição de rotor bloqueado ou má aceleração, o dispositivo de proteção deve ser ajustado para atuar antes que a isolação do

estator sofra danos térmicos ou os condutores do rotor derretam [1]. Dependendo do projeto, um motor pode ser limitado pelo estator ou pelo rotor durante a condição de rotor bloqueado. Os fabricantes fornecem o tempo máximo de rotor bloqueado permitido. É usual fornecer tanto o tempo de rotor bloqueado quanto temperatura nominal de operação.

1.2.2 Desbalanceamento

Conforme norma NBR 7094:1996 [2] para motores de indução, as combinações das variações de tensão e de frequência são classificadas como Zona A ou Zona B, conforme Figura 4 [3].

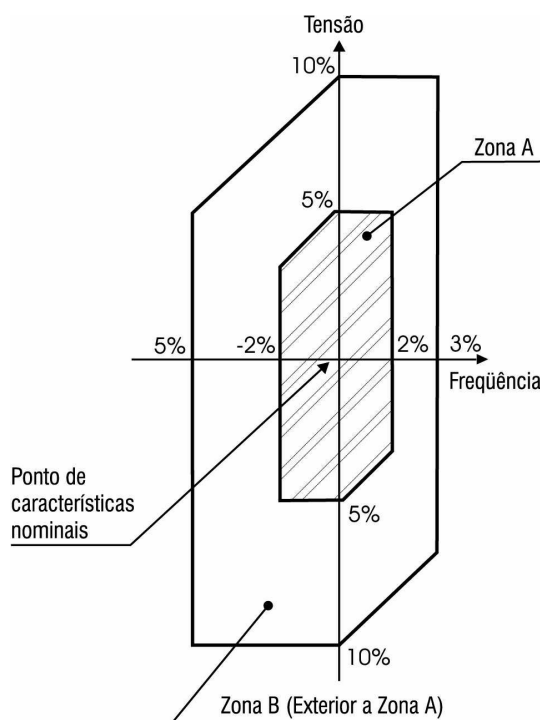


Figura 4 – Limites de variações e de frequência em funcionamento

Um motor deve ser capaz de desempenhar sua função principal na Zona A, mas não pode atender completamente às suas características de desempenho de tensão e frequência nominal (ponto de característica nominal – Figura 4), apresentando alguns desvios. As elevações de temperaturas podem ser superiores aquelas à tensão e frequência nominais. Um motor deve ser capaz de desempenhar sua função principal na Zona B, mas pode apresentar desvios superiores àquelas da Zona A no que se refere às características de desempenho à tensão e frequência nominais. As elevações de temperaturas podem ser superiores às verificadas com tensão e frequência nominais e muito provavelmente superiores àquelas da Zona A. O funcionamento prolongado na periferia da Zona B não é recomendado.

Contudo outros tipos de variações podem ser bem mais prejudiciais para os motores de indução, como um pequeno desbalanceamento de tensão que leva a um grande desbalanceamento de corrente [12].

As maiores causas dos desbalanceamentos de tensão, do ponto de vista de utilização, são as cargas monofásicas inseridas não uniformemente para as três fases. Isto é evidente em diversos sistemas elétricos rurais e também pode ser encontrado em grandes sistemas elétricos urbanos onde grandes demandas monofásicas são impostas. Independente da causa, o desbalanceamento de tensão é prejudicial aos motores trifásicos de indução.

O funcionamento dos motores trifásicos de indução sob a condição de desbalanceamento pode causar sérios efeitos indesejáveis como sobre-aquecimento e redução do torque na ponta de eixo do motor. A amplitude desses efeitos indesejáveis está diretamente relacionada com o nível de desbalanceamento. Os efeitos indesejáveis do desbalanceamento da tensão de alimentação dos motores de indução vêm do fato que o desbalanceamento divide-se em duas componentes opostas:

- a) Componente de sequência positiva
- b) Componente de sequência negativa

A componente de sequência positiva produz o torque desejado, mas geralmente de menor amplitude que o torque normal de saída (sem desbalanceamento de tensão) e com um valor maior que as perdas do motor, porque a sequência positiva é normalmente menor do que a tensão nominal (em geral, um efeito similar ao funcionamento com a tensão reduzida). Já a componente de sequência negativa produz um torque negativo indesejado (subtração) no sentido contrário ao torque desejado.

Toda a potência requerida para produzir este torque transforma-se diretamente em perdas que devem ser absorvidas pelo motor. Como resultado do desbalanceamento a sequência positiva de tensão diminui e a sequência negativa de tensão aumenta. Ambas as mudanças são muito ruins para o bom funcionamento do motor. Sabendo-se disso o primeiro passo é determinar as sequências positivas e negativas produzidas por um desbalanceamento da tensão de alimentação. Esta análise quantitativa é realizada através do uso de componentes simétricas e a porcentagem de desbalanceamento de amplitude pode ser calculada como mostrado abaixo[1][5]:

$$\% \text{ desbalanceamento} = \frac{\text{Máxima desvio da tensão média}}{\text{tensão média}}$$

Com isso, pode-se através de ensaios obter as curvas de aumento de temperatura e perdas em função da porcentagem de desbalanceamento como apresentado na Figura 5 [5].

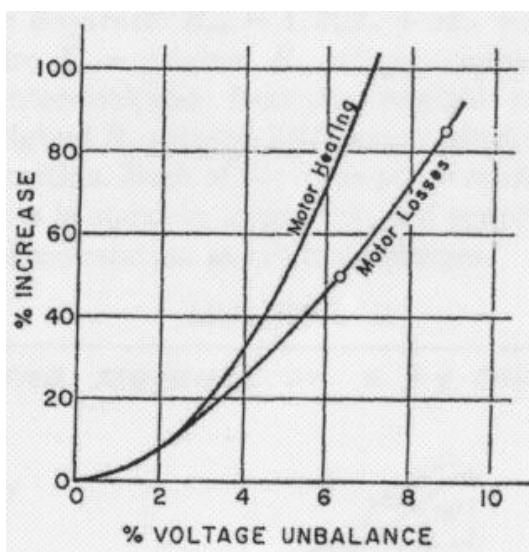


Figura 5 – Aumento de temperatura e perdas versus % de desbalanceamento

1.2.3 Falta de fase

Pelas estatísticas, é mostrado que quando ocorre à queima de um motor polifásico, na maioria das vezes, se deve ao fato de falta de uma fase. A falta de fase pode ocorrer pela abertura de uma das fases da linha, quando o motor está em funcionamento, pelo salto de um fusível ou uma avaria nos cabos ou nos contatos dos contadores.

Se o motor estiver parado, ao conectá-lo à rede com falta de fase, este não partirá; se por outro lado já estiver em movimento, sofrerá uma redução do seu torque, podendo parar ou continuar com velocidade mais baixa, de acordo com a solicitação de carga em comparação com o torque do motor [10].

É importante saber prever a capacidade de torque e as correntes durante uma falta de fase, para dimensionar o sistema de proteção dos motores contra este tipo de avaria.

Para o dimensionamento do sistema de proteção, é necessário conhecer o tempo máximo permitido do motor em falta de fase, a fim de permitir a coordenação do sistema que atua na proteção do motor. O tempo máximo permitido em falta de fase é o período máximo de tempo que o motor pode funcionar, com uma fase desconectada, sem ocorrência de danos nos enrolamentos. O tempo máximo permitido em falta de fase está diretamente relacionado com a máxima temperatura que pode ocorrer nos enrolamentos do motor, sem causar danos ao material isolante. Esta temperatura está, portanto, relacionada com a classe de temperatura do motor que, por sua vez, depende do material que constitui o sistema de isolamento dos condutores.

A máquina acionada retira do motor trifásico um determinado conjugado. Faltando uma fase o motor procura continuar fornecendo o mesmo conjugado anterior, ocasionando assim elevação da corrente de alimentação.

Assim, um motor funcionando perante potência nominal e cujo regime de funcionamento é perturbado pelo desligamento de uma fase, passará a atuar dentro de uma das seguintes condições:

- Frenagem brusca, porque o motor não tem possibilidade de fornecer o conjugado exigido pela carga.
- Queda de rotação, porque o conjugado solicitado pela carga está abaixo do conjugado do motor.

Porém em ambos os casos a elevação de corrente perante falta de fase é bastante significativa, independente do tipo de ligação do motor.

Motores trifásicos de indução funcionam frequentemente apenas com carga parcial durante períodos prolongados, devido às condições flutuantes de carga ou da previsão de uma potência de reserva. Por outro lado, motores trifásicos têm uma faixa crítica de operação quando uma fase é desligada, que aparece com cerca de 40 a 60% de carga nominal [9]. Se com esta carga parcial, houver o desligamento de uma fase, então a corrente de serviço nos condutores externos atinge valores próximos ao da corrente nominal, o que, logicamente, não levaria ao disparo de um relé ajustado para o valor nominal. Perante tais cargas parciais e desligamento de uma fase, podem aparecer elevações de temperatura no estator, que vão destruir a isolação do enrolamento.

Por essa razão, a necessidade de uma proteção contra a falta de fase, sobretudo na faixa das cargas parciais de motores trifásicos.

Teoricamente seria possível obter uma proteção eficiente da faixa crítica dos motores, com um relé de sobrecarga térmico. Entretanto, neste caso o relé de sobrecarga, sem a proteção de falta de fase, deveria ser ajustado ao valor da corrente de carga real o que frequentemente não é possível, fazendo com que, fundamentalmente, o relé de sobrecarga seja ajustado para o valor da corrente nominal do motor, independente da carga acionada.

Uma avaliação mais criteriosa pode ser realizada, através de ensaios e determinando quais potências de motores trifásicos de indução a condição de falta de fase é mais grave. Obtêm-se valores de temperatura nos enrolamentos mais quentes do estator, referindo-se a temperatura nominal e os representam em função da potência nominal.

Um exemplo de curva característica das temperaturas dos enrolamentos, referindo-se a temperatura nominal sob falta de fase pode ser observado na Figura 6 [10].

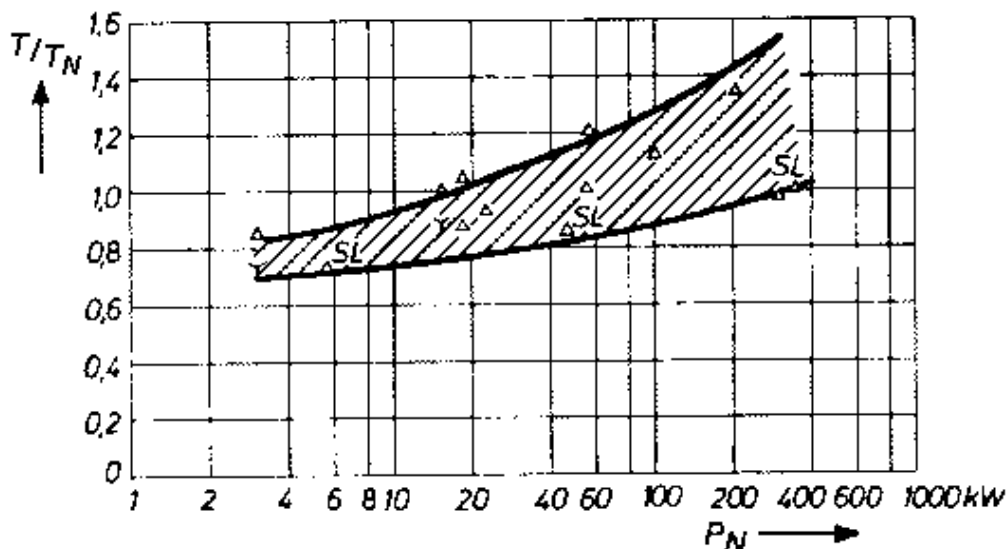


Figura 6 - Temperatura do enrolamento mais quente, referido à temperatura nominal em condições de funcionamento do motor perante falta de uma fase

1.3 Dispositivos de proteção

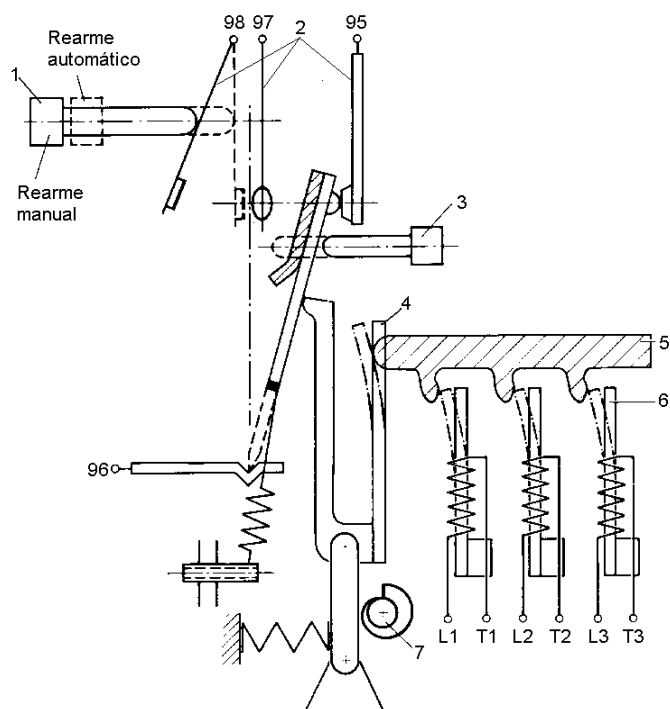
Os motores trifásicos de indução, operando em regime contínuo (S1), devem ser protegidos contra aumentos de temperatura por um dispositivo de proteção. Os mais usuais são os relés de sobrecarga térmicos com sensibilidade a falta de fase com funções de proteção contra sobrecarga e rotor bloqueado.

1.3.1 Relé de sobrecarga térmico

Os relés de sobrecarga são usados para proteção de equipamentos elétricos, como motores trifásicos de indução e transformadores contra sobre-aquecimento, onde o aumento de temperatura imposta ao equipamento é monitorado nas três fases. São dispositivos de proteções dependentes da corrente e com a característica de atuação (disparo) corrente \times tempo estabelecida pelo princípio de bimetais.

Os relés de sobrecarga térmicos possuem 3 laminas de bimetais. Os bimetais são aquecidos indiretamente pela corrente do motor que passa através das resistências de aquecimento enroladas ao redor dos bimetais (L1/T1, L2/T2 e L3/T3). Com a variação de temperatura os bimetais flexionam-se e as plaquetas deslizantes (*sliders*) movimentam-se, atuando diretamente na alavanca diferencial. Esse sistema de monitoramento por sua vez atua no sistema de disparo (alavanca/mola) para disparo do relé e abertura dos contatos auxiliares.

Um desenho esquemático do princípio de operação do relé de sobrecarga térmico é apresentado na Figura 7 [25].



1 – Botão de rearme (manual / automático)

2 – Contatos auxiliares

3 – Botão de teste

4 – Alavanca diferencial

5 – Plaquetas deslizantes

6 – Bimetáis

7 – Parafuso de ajuste de corrente

Figura 7 – Princípio de operação do relé de sobrecarga térmico

A curva característica de um relé de um relé de sobrecarga é dada pelo tempo de disparo em função da corrente de operação, que é expressa como um múltiplo da corrente ajustada no relé (Figura 8).

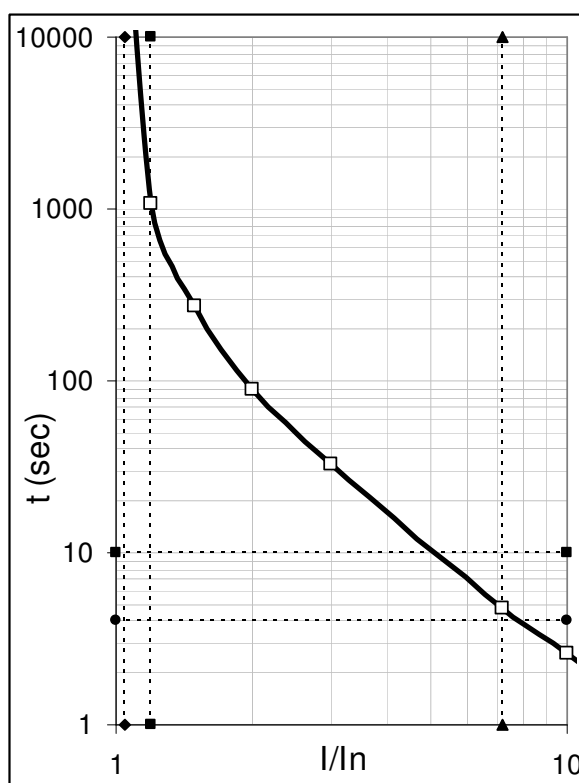


Figura 8 – Curva característica tripolar do relé de sobrecarga para condição normal de partida (valores médios)

A classe de disparo determina o tempo limite de disparo para uma sobrecarga tripolar simétrica em 7,2 vezes a corrente ajustada, a frio. Nessa condição, um relé de sobrecarga classe 10 deve disparar em até 10 segundos e um relé de sobrecarga classe 30 em até 30 segundos. Relés de sobrecarga classe 10 são utilizados para condições de partida leves, enquanto os relés classe 30 são usados para partida de regime pesado.

1.3.2 Relé de sobrecarga eletrônico

O princípio de funcionamento dos relés eletrônicos baseia-se na medição de cada uma das fases do motor através de um transformador de corrente. A corrente do secundário é convertida para uma tensão proporcional. Esta tensão proporcional é comparada com alguns sinais de referencia. Dependendo do resultado da comparação um sinal (pulso) é dado para uma bobina de saída que comuta os contatos auxiliares (atuação do relé eletrônico).

A curva característica dos relés de sobrecarga eletrônico, bem como dos relés de sobrecarga térmico (Figura 8), estabelece o tempo de disparo em função da corrente de funcionamento, que é expressa como um múltiplo da corrente ajustada. A diferença é a maior precisão do tempo de disparo e menor dependência do processo de fabricação, influencia da temperatura e tolerâncias de calibração.

Geralmente, os relés de sobrecarga eletrônico fazem proteção contra desbalanceamento. O nível de desbalanceamento é normalmente um valor fixo em torno de 40% do valor nominal. Deste modo, um sobre-aquecimento do motor por causa de desbalanceamento ou falta de fase também é detectado.

2 Detalhamento do trabalho

O objetivo dessa dissertação é investigar e conhecer o desempenho dos dispositivos de proteção de baixa tensão que protegem motores de indução trifásico operando em condições anormais. Rotor bloqueado e falta de fase são as falhas mais comuns a que os motores trifásicos de indução são expostos nas mais diversas aplicações.

Para essa investigação, diferentes etapas devem ser analisadas e avaliadas. A estrutura de investigação é ilustrada na Figura 9 e Figura 10, e os trabalhos são descritos abaixo.

Capítulo 3) Estudo dos motores trifásicos de indução

A primeira etapa desta dissertação é conhecer as características gerais dos motores elétricos, principalmente o motor de indução trifásico, que é o tipo de motor elétrico mais utilizado, e identificar as variáveis e limites relacionados à sua vida elétrica.

Capítulo 4) Definições sobre valores de temperatura do motor elétrico

Os valores de temperatura do motor elétrico estão diretamente relacionados com os valores limites de projeto do motor de indução trifásico e, conseqüentemente, a vida elétrica do motor. O estudo e definição das principais características de projeto são essenciais. As principais características são: dissipação de calor, elevação de temperatura, classe de isolamento e temperatura máxima permitida do motor elétrico. Estas definições devem ser aplicadas em todas as condições de operação do motor elétrico.

Capítulo 5) Estudo do motor elétrico operando sob condições anormais

O comportamento do motor de indução trifásico é completamente diferente quando operando sob condições anormais comparado com sua operação em condições normais. A danificação do motor pode ser mais rápida e pior. Por causa disso, é muito importante analisar os efeitos da operação em condição anormal no motor elétrico para entender e dimensionar o dispositivo de proteção mais adequado.

Capítulo 6) Investigação do tempo máximo permitido de falta de fase e rotor bloqueado e cálculo teórico

Usando os resultados e conhecimento dos itens (IV) e (V), é possível investigar e deduzir por meios de equações matemáticas os tempos máximos permitidos de falta de fase e rotor bloqueado.

Usando as equações resultantes, pode ser calculado o tempo máximo permitido teórico que depende de parâmetros de projeto do motor elétrico e características do material de isolamento utilizado.

Capítulo 7) Estudo dos dispositivos de proteção de motor

Conhecendo as características do motor de indução trifásico e os tempos máximos permitidos para falta de fase e rotor bloqueado, o dispositivo de proteção mais usado para proteção de motor sob estas condições devem ser estudados. Do mesmo modo como para o motor de indução trifásico, é importante conhecer as características principais e sistemas de funcionamento dos dispositivos de proteção.

Capítulo 8-9) Testes experimentais, medições, avaliações e comparativos

Através de testes experimentais é possível determinar e conhecer o comportamento térmico do motor de indução trifásico operando sob condições de falta de fase e rotor bloqueado, bem como determinar as curvas características dos relés de sobrecarga térmico. Deste modo, é possível analisar e comparar o comportamento térmico do motor com a curva característica do relé e avaliar a proteção efetiva do motor pelo relé e sobrecarga térmico.

Capítulo 10) Projeto do relé de sobrecarga eletrônico, simulação e validação de protótipo

O relé de sobrecarga eletrônico é uma evolução do sistema de proteção de motores e é cada vez mais utilizado devido ao crescimento das aplicações complexas para os motores elétricos. O estudo do projeto, simulação e análise do protótipo são necessários para validação da proteção efetiva da proteção do motor, além de apresentar as vantagens comparadas ao relé de sobrecarga térmico.

Capítulo 11) Conclusões e resultados

As conclusões e resultados dessa dissertação servirão como recomendação e decisão para um desenvolvimento pela WEG Indústrias – Acionamentos, bem como proposta de melhoria nos dispositivos de proteção e suas características.

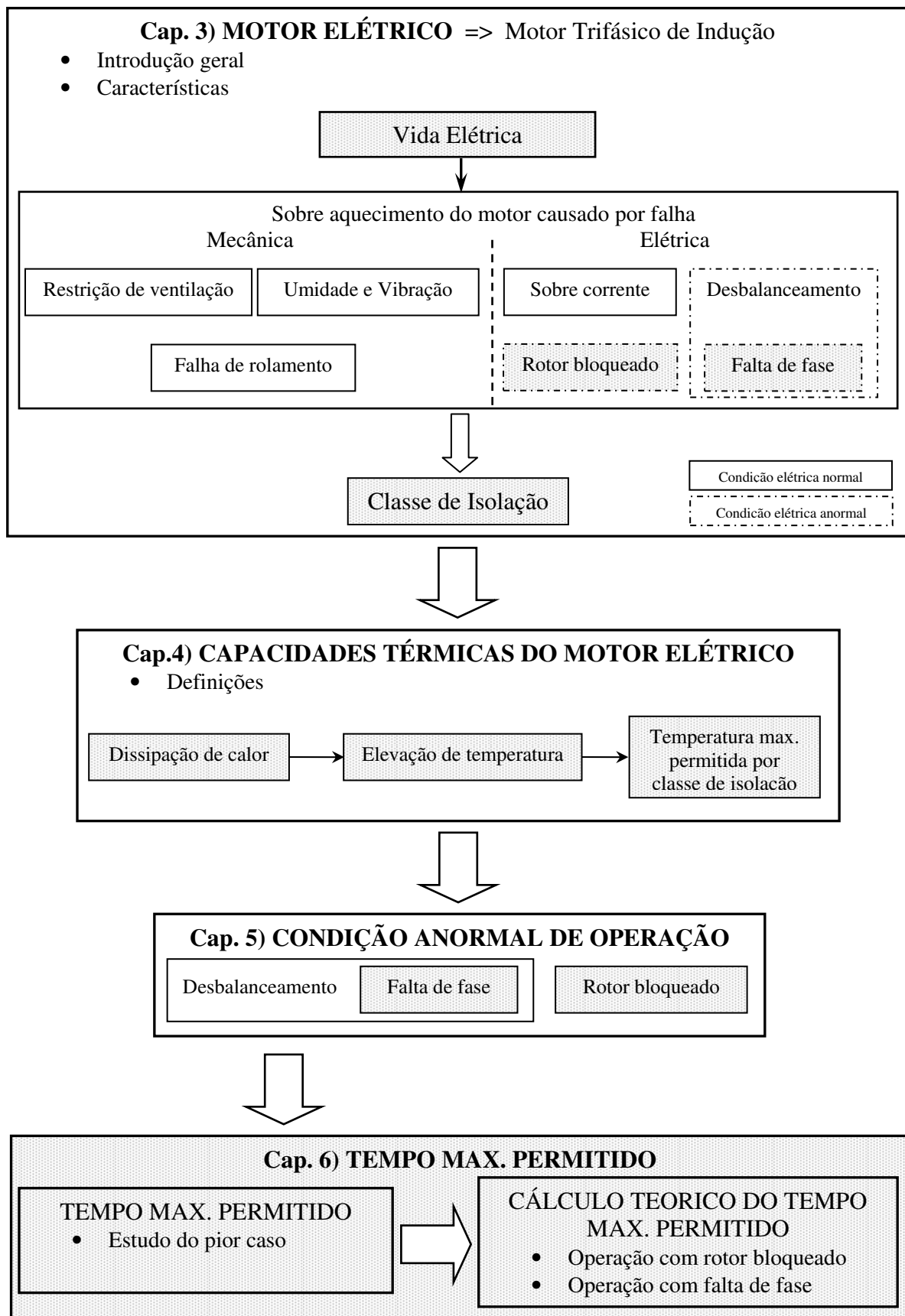


Figura 9 – Estrutura de investigação (parte 1)

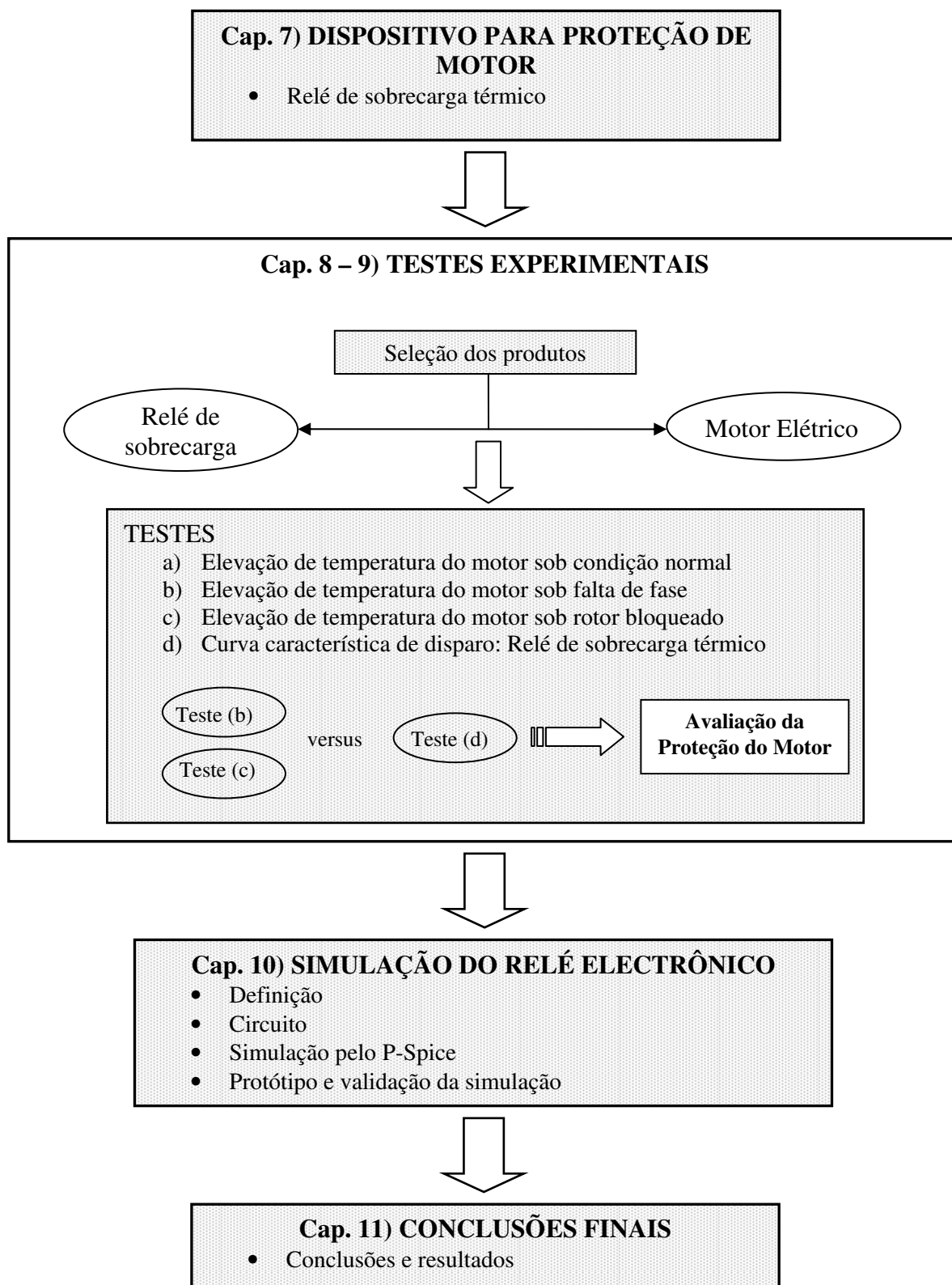


Figura 10 – Estrutura de investigação (parte 2)

3 Motores elétricos

O motor elétrico é uma máquina capaz de transformar energia elétrica em energia mecânica. O motor elétrico é o tipo mais usado entre todos os tipos de motores, pois combina as vantagens da utilização de energia elétrica, baixo custo, facilidade de transporte, limpeza e simplicidade de comando, com sua construção simples, custo reduzido, grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos e melhores rendimentos.

O tipo de motor elétrico mais comum é o motor de indução.

3.1 Motor de indução

O motor de indução opera normalmente com uma velocidade constante, que varia ligeiramente com a carga mecânica aplicada ao eixo. Devido a sua grande simplicidade, robustez e baixo custo é o motor mais utilizado de todos, sendo adequado para quase todos os tipos de máquinas acionadas.

3.1.1 Motor de indução trifásico

O motor de indução trifásico é composto fundamentalmente de duas partes: estator e rotor como mostrado na Figura 11.

O estator é composto por:

- a) Carcaça, que é a estrutura suporte do conjunto;
- b) Núcleo de chapas (2);
- c) Enrolamentos trifásicos (8) compostos por três conjuntos iguais de bobinas, uma para cada fase, formando um sistema trifásico ligado à rede trifásica de alimentação.

O rotor é composto por:

- a) Eixo, o qual transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor (7);
- b) Barras e anéis de curto-circuito (12);

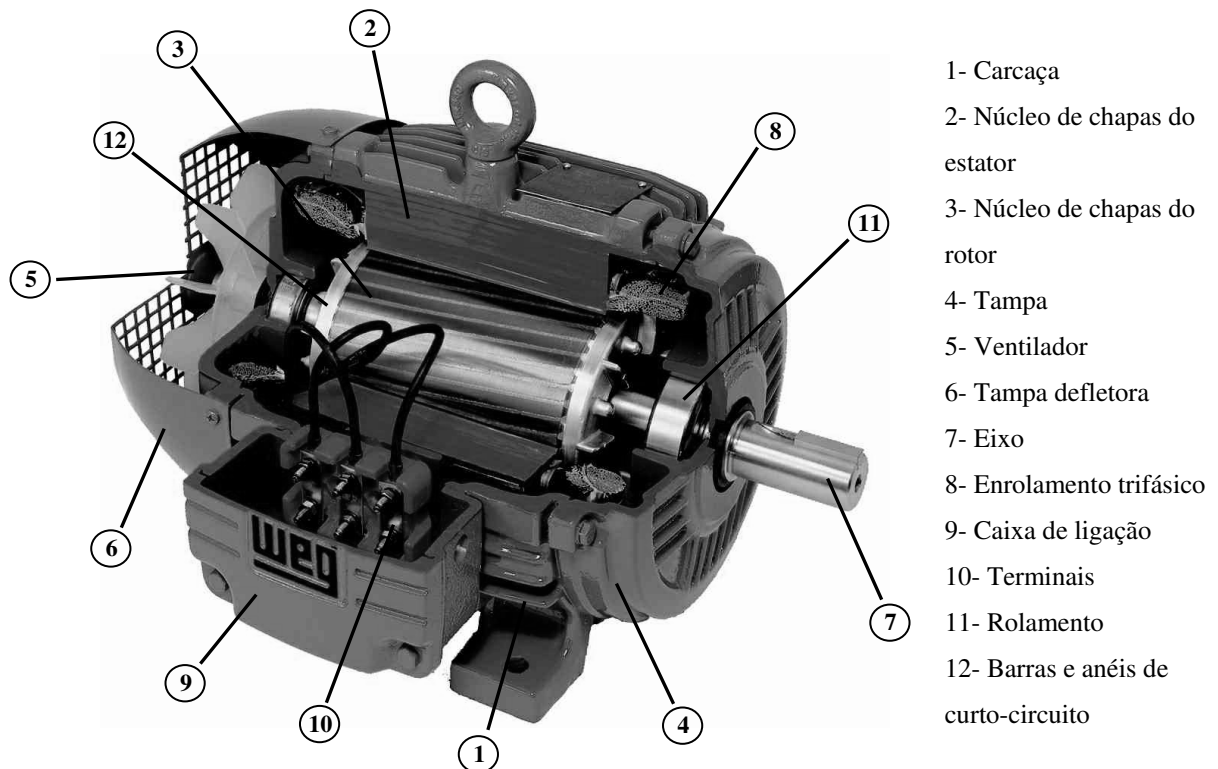


Figura 11 – Estrutura básica do motor elétrico

O rotor é constituído de um conjunto de barras não isoladas interligadas por anéis de curto-circuito. Isso também é chamado de gaiola e o motor construído deste modo é chamado “motor gaiola de esquilo”.

O que caracteriza o motor de indução é que só o estator é ligado à rede de alimentação. O rotor não é alimentado externamente e as correntes que circulam nele, são induzidas eletromagneticamente pelo estator, por isso o seu nome de motor de indução.

3.1.2 Campo girante

Quando uma bobina é percorrida por uma corrente elétrica, é criado um campo magnético dirigido conforme o eixo da bobina e de valor proporcional à corrente.

A Figura 12 mostra um “enrolamento monofásico” atravessado por uma corrente I , e o campo H é criado por ela. O enrolamento é constituído de um par de pólos (um pólo “norte” e um pólo “sul”), cujos efeitos se somam para estabelecer o campo H . O fluxo magnético atravessa o rotor entre os dois pólos e se fecha através do núcleo do estator.

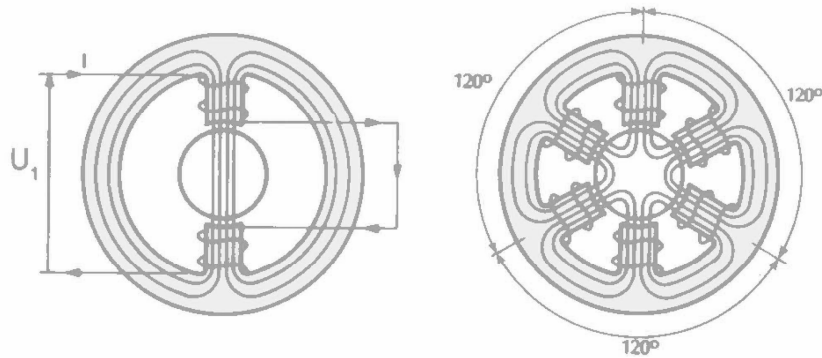


Figura 12 – Campo girante

Se a corrente I é alternada, o campo H também é, e o seu valor a cada instante será representado pelo mesmo gráfico da Figura 12 [3], inclusive invertendo o sentido em cada meio ciclo.

Um “enrolamento trifásico”, que é formado por três monofásicos defasados 120° entre si como apresentado na Figura 12. Se este enrolamento for alimentado por um sistema trifásico, as correntes I_1 , I_2 e I_3 criarão, do mesmo modo, os seus próprios campos magnéticos H_1 , H_2 e H_3 . Estes campos são defasados entre si de 120° . Além disso, como são proporcionais às respectivas correntes, são defasados no tempo, também de 120° entre si e podem ser representados por um gráfico igual ao da Figura 13 [3].

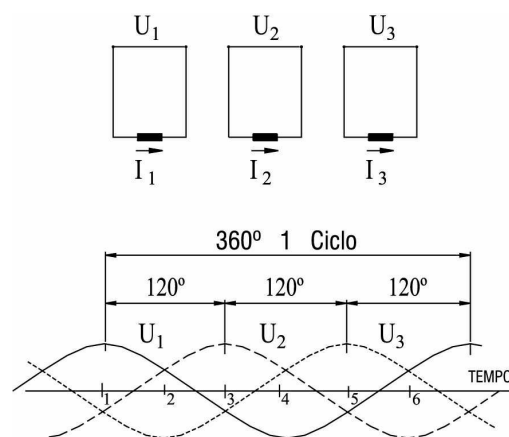
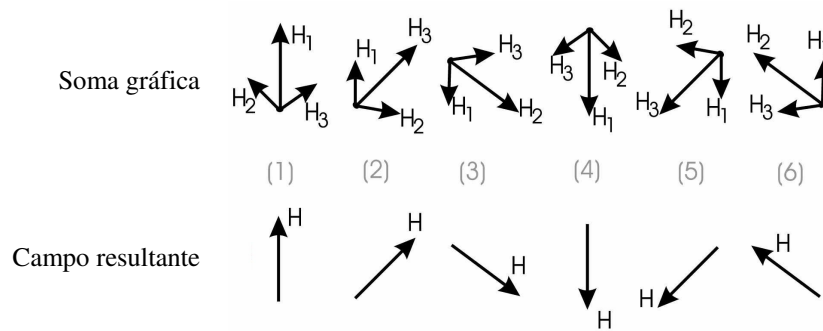


Figura 13 – Ciclo completo de um sistema balanceado

O campo total H resultante, a cada instante, será igual à soma gráfica dos três campos H_1 , H_2 e H_3 naquele instante.

A Figura 14 representa esta soma gráfica para seis instantes sucessivos.

Figura 14 – Soma gráfica dos campos H

No instante (1), a Figura 13, mostra através de U_1 , U_2 e U_3 , que o campo H_1 é máximo e os campos H_2 e H_3 são negativos e de mesmo valor, iguais a $0,5H_1$.

Na parte superior da Figura 14, instante (1), três campos são mostrados, levando em conta que o campo negativo é representado por uma seta de sentido oposto ao que seria normal. O campo resultante (soma gráfica) é mostrado na parte inferior da Figura 14 (1), tendo a mesma direção do enrolamento da fase.

Repetindo a construção para os pontos 2, 3, 4, 5 e 6 da Figura 13, observa-se que o campo resultante H tem intensidade “constante”, porém sua direção vai girando, completando uma volta no fim de um ciclo. Assim, quando um enrolamento trifásico é alimentado por correntes trifásicas, cria-se um campo girante, como se houvesse um único par de pólos girantes, de intensidade constante.

3.2 Vida do motor elétrico

Sendo o motor de indução, uma máquina robusta e de construção simples, a sua vida útil depende quase exclusivamente da vida útil da isolamento dos enrolamentos. Esta é afetada por muitos fatores, como umidade, vibrações, ambientes corrosivos e outros. Dentre todos os fatores, o mais importante é sem dúvida a temperatura de trabalho dos materiais isolantes empregados. Um aumento de 8°C a 10°C na temperatura da isolamento reduz sua vida útil pela metade.

Quando falamos em redução da vida útil do motor, não nos referimos às temperaturas elevadas, quando o isolante se queima e o enrolamento é destruído de repente. Vida útil da isolamento (em termos de temperatura de trabalho, bem abaixo daquela em que o material se queima), refere-se ao envelhecimento gradual do isolante, que vai se tornando ressecado, perdendo o poder isolante, até que não suporte mais a tensão aplicada e produza o curto-circuito.

A experiência mostra que a isolação tem uma duração praticamente ilimitada, se a sua temperatura for mantida abaixo de certo limite. Acima deste valor, a vida útil da isolação vai se tornando cada vez mais curta, à medida que a temperatura de trabalho é mais alta.

Este limite de temperatura é muito mais baixo que a temperatura de “queima” do isolante e depende do tipo de material empregado

Esta limitação de temperatura se refere ao ponto mais quente da isolação e não necessariamente ao enrolamento todo. Evidentemente, basta um ponto fraco no interior da bobina para que o enrolamento fique inutilizado.

3.3 Classe de isolamento

Como foi visto anteriormente, o limite de temperatura depende do tipo de material empregado. Para fins de normalização, os materiais isolantes e os sistemas de isolamento (cada um formado pela combinação de vários materiais) são agrupados em classes de isolamento, cada qual definida pelo respectivo limite de temperatura, ou seja, pela maior temperatura que o material pode suportar continuamente sem que seja afetada sua vida útil.

As classes de isolamento utilizadas em máquinas elétricas e os respectivos limites de temperatura são mostrados na Tabela 1 [17]:

Os sistemas de isolação são projetados e testados para suportar seus respectivos limites de temperatura por longo tempo sem redução significativa em suas propriedades mecânicas e de isolação.

Avaliações típicas de vida térmica para os sistemas de isolação apresentam o impacto do aumento de temperatura na vida útil dos enrolamentos [20], como ilustrada na Figura 15.

De acordo com a Figura 15 [20], quando o sistema de isolação é submetido a uma temperatura de 130 °C, sua vida será 20.000 horas para classe B (a mais comum usada em motores de indução trifásico) e 90.000 horas para classe F – pontos vermelhos. Do mesmo modo, quando o sistema de isolação é submetido a uma temperatura de 155 °C, sua vida será de 4.000 horas para classe B e 20.000 horas para classe F – pontos azuis. Assim, as capacidades de temperatura para cada classe de isolamento são definidas como sendo a máxima temperatura a qual o isolamento pode trabalhar para propiciar uma vida média de 20.000 horas [18][19].

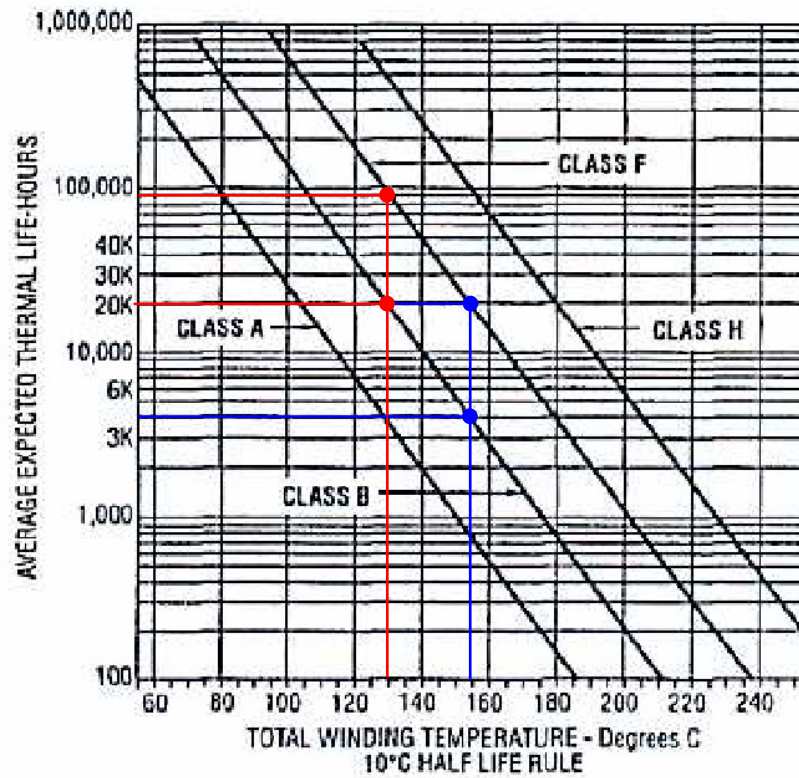


Figura 15 – Avaliação de vida para sistemas de isolamento

4 Análise dos efeitos térmicos em motores elétricos

A potência útil fornecida pelo motor na ponta do eixo é menor que a potência que o motor absorve da linha de alimentação, isto é, o rendimento do motor é sempre inferior a 100%. A diferença entre as duas potências representa as perdas, que são transformadas em calor.

Esse calor aquece o enrolamento e deve ser dissipado para fora do motor, para evitar que a elevação de temperatura seja excessiva. O mesmo acontece em todos os tipos de motores. No motor de automóvel, por exemplo, o calor gerado pelas perdas internas tem que ser retirado do bloco do motor pelo sistema de circulação de água com o radiador ou pela ventoinha, em motores resfriados a ar.

4.1 Dissipação de calor

O calor gerado pelas perdas no interior do motor é dissipado para o ar ambiente através da superfície externa da carcaça. Em motores fechados essa dissipação é normalmente auxiliada pelo ventilador montado no próprio eixo do motor.

Uma boa dissipação de calor depende da:

- Eficiência do sistema de ventilação;
- Área total de dissipação da carcaça;
- Diferença de temperatura entre a superfície externa da carcaça e do ar ambiente

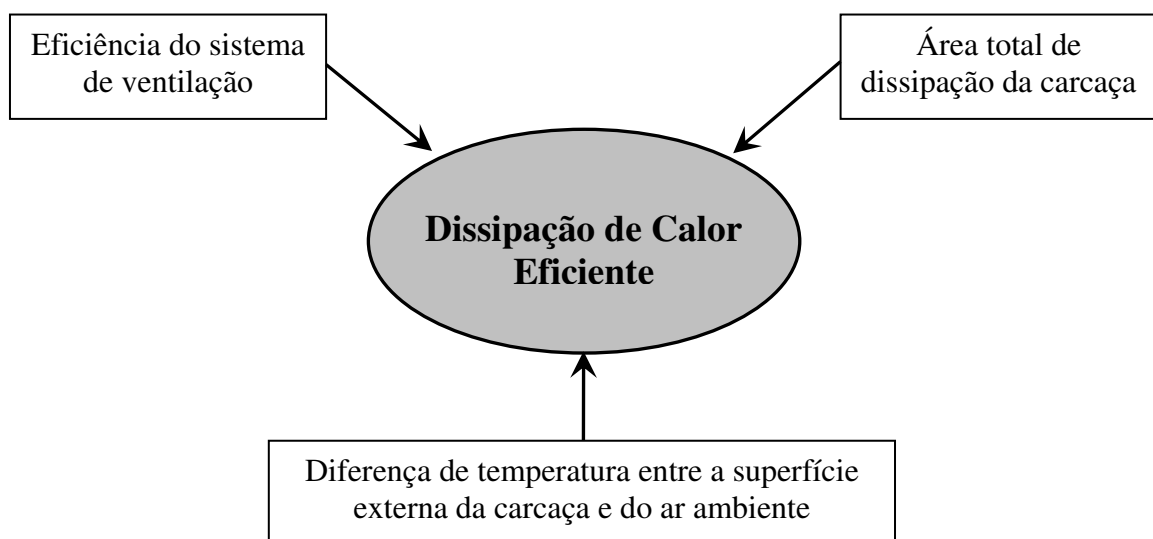


Figura 16 – Fatores para uma eficiente dissipação de calor

Sistema de ventilação eficiente: O sistema de ventilação bem projetado, além de ter um ventilador eficiente, capaz de movimentar grande volume de ar, deve dirigir esse ar de modo a varrer toda a superfície da carcaça, onde se dá a troca de calor.

Área total de dissipação da carcaça: A área total de dissipação deve ser a maior possível. Entretanto, um motor com uma carcaça muito grande, para obter maior área, seria muito caro e pesado, além de ocupar muito espaço. Por isso, a área de dissipação disponível é limitada pela necessidade de fabricar motores pequenos e leves. Isso é compensado em parte, aumentando-se a área disponível por meio de aletas de resfriamento, fundidas na carcaça.

Diferença de temperatura entre a superfície externa da carcaça e do ar ambiente: Um sistema de resfriamento eficiente é aquele que consegue dissipar a maior quantidade de calor disponível, através da menor área de dissipação. Para isso, é necessário que a queda interna de temperatura, mostrada na Figura 17, seja minimizada. Isto quer dizer que deve haver uma boa transferência de calor do interior do motor até a superfície externa.

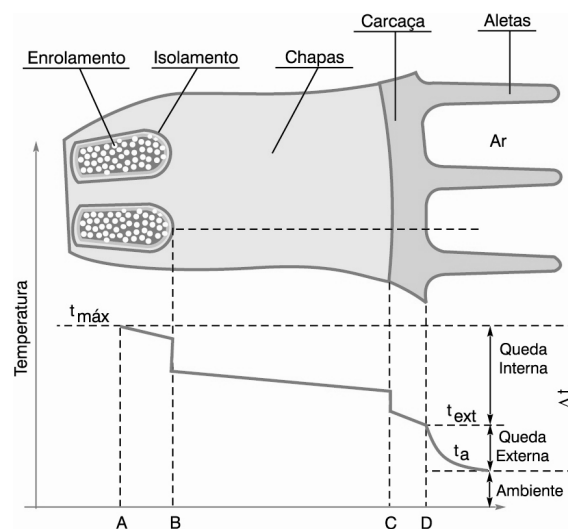


Figura 17 – Dissipação de calor do motor

O que realmente quer se limitar é a elevação da temperatura no enrolamento sobre a temperatura do ar ambiente. Esta diferença total (Δt) é comumente chamada “elevação de temperatura” do motor e, como é indicado na Figura 17 [3], é igual à soma da queda interna com a queda externa.

Como se vê, o objetivo é reduzir a queda interna (melhorar a transferência de calor) para poder ter uma queda externa maior possível para boa dissipação de calor. A queda interna de temperatura depende de diversos fatores como indica a Figura 17, onde as temperaturas de certos pontos importantes do motor estão representadas e explicadas a seguir:

A – Ponto mais quente do enrolamento, no interior da ranhura, onde é gerado o calor proveniente das perdas nos condutores.

AB – Queda de temperatura na transferência de calor do ponto mais quente até os fios externos. Como o ar é um péssimo condutor de calor, é importante que não haja espaços vazios no interior da ranhura, isto é, as bobinas devem ser compactas e a impregnação com verniz deve ser perfeita.

B – Queda através do isolamento da ranhura e no contato deste com os condutores de um lado, e com as chapas do núcleo, do outro. O emprego de materiais modernos melhora a transmissão de calor através do isolante; a impregnação perfeita melhora o contato do lado interno, eliminando espaços vazios; o bom alinhamento das chapas estampadas melhora o contato do lado externo, eliminando camadas de ar que prejudicam a transferência de calor.

BC – Queda de temperatura por transmissão através do material das chapas do núcleo.

C - Queda no contato entre o núcleo e a carcaça. A condução de calor será tanto melhor quanto mais perfeito for o contato entre as partes, dependendo do bom alinhamento das chapas, e precisão da usinagem da carcaça. Superfícies irregulares deixam espaços vazios entre elas, resultando mau contato e, portanto, má condução do calor e elevada queda de temperatura neste ponto.

CD – Queda de temperatura por transmissão através da espessura da carcaça.

4.2 Temperatura ambiente

Temperatura ambiente é a temperatura do ar ao redor do motor ou temperatura do ambiente (sala) que motor está montado. Este é o ponto inicial ou temperatura que o motor assume quando está desligado e completamente frio.

4.3 Elevação de temperatura

Elevação de temperatura é a mudança de temperatura de uma parte crítica do motor quando ele está operando. Por exemplo: se um motor está localizado em um ambiente com temperatura de 35°C, e então é partido e operando continuamente, as temperaturas nos enrolamentos podem aumentar de 35°C para uma temperatura maior. A diferença entre essa temperatura inicial e a temperatura final é a elevação de temperatura do motor.

4.4 Medição da temperatura dos enrolamentos

É muito difícil medir a temperatura do enrolamento com termômetros ou termopares, pois a temperatura varia de um ponto a outro e nunca se sabe se ponto da medição está próximo do ponto mais quente.

O método mais preciso e mais confiável de se medir a temperatura de um enrolamento é através da variação de sua resistência ôhmica com a temperatura. A resistência ôhmica do enrolamento é medida em uma temperatura desconhecida e comparada com a resistência ôhmica em uma temperatura conhecida [23].

É um fato conhecido que os materiais condutores mudam suas propriedades resistivas de acordo com a temperatura – Figura 18. Desconsiderando as não linearidades do sistema, é possível deduzir experimentalmente o valor de temperatura para resistência zero de um condutor específico.

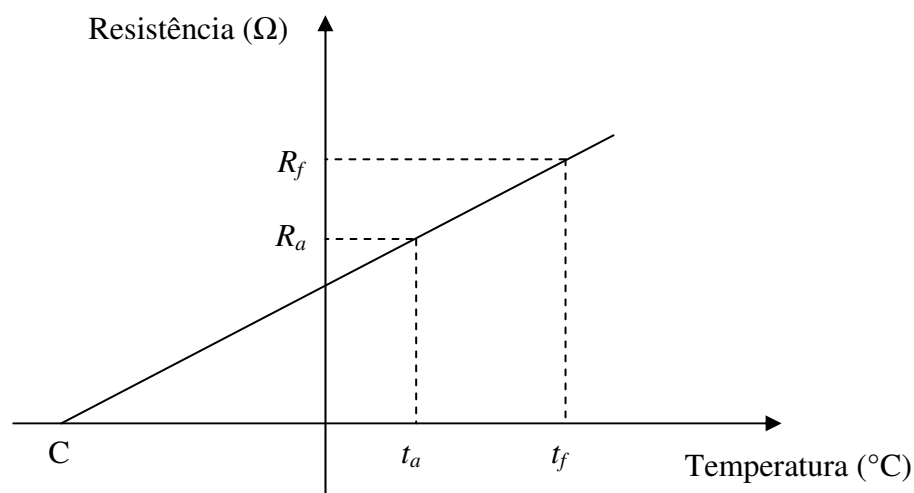


Figura 18 – Relação entre temperatura e resistência ôhmica

Onde:

Δt = elevação de temperatura

t_f = temperatura desconhecida (°C)

t_a = temperatura conhecida (°C) – praticamente igual à temperatura ambiente.

R_f = resistência medida no instante t_f

R_a = resistência medida no instante t_a

C = temperatura para resistência zero (para cobre, $C = 234,5$).

Através da proporcionalidade de triângulos similares, permite que se expresse a relação entre resistência e temperatura conforme abaixo [23]:

$$\frac{t_f + C}{t_a + C} = \frac{R_f}{R_a} \quad (1)$$

Rearranjando os termos da equação (1), obtém-se a equação (2).

$$\Delta t = t_f - t_a = \left(\frac{R_t}{R_a} - 1 \right) (t_a + C) \quad (2)$$

A temperatura do ponto mais quente do enrolamento deve ser mantida abaixo do limite da classe. A temperatura máxima é igual à soma da temperatura ambiente com a elevação de temperatura, Δt , mais a diferença que existe entre a temperatura média do enrolamento (medido pelo método de variação de resistência) e a do ponto mais quente.

As normas de motores fixam a máxima elevação de temperatura Δt , de modo que a temperatura do ponto mais quente fica limitada, baseada nas seguintes considerações, conforme IEC 60034-1 [21] e NEMA MG1 [22]:

a) A temperatura ambiente é no máximo 40°C. Acima disso as condições de trabalho são consideradas especiais.

b) A diferença entre a temperatura média e a do ponto mais quente não varia muito de motor para motor e seu valor estabelecido em norma é 5°C para as classes A e E, 10°C para a classe B e 15°C para as classes F e H

As normas de motores, portanto, estabelecem um máximo para a temperatura ambiente e especificam uma elevação de temperatura máxima para cada classe de isolamento. Assim, fica indiretamente limitada à temperatura do ponto mais quente do motor. Os valores e a composição da temperatura admissível do ponto mais quente são indicados na Tabela 3.

Classe de isolamento	A	E	B	F	H
Temperatura ambiente °C	40	40	40	40	40
Δt = elevação de temperatura (método da resistência) °C	60	75	80	100	125
Diferença entre o ponto mais quente e a temperatura média °C	5	5	10	15	15
Total = temperatura no ponto mais quente °C	105	120	130	155	180

Tabela 3 – Temperatura admissível do ponto mais quente por classe de isolamento

Altitude < 1,000 m acima do nível do mar.

Temperatura ambiente máxima < 40°C

5 Condições anormais de operação dos motores elétricos

As principais condições anormais de operação de motores e que podem causar danos aos motores de indução são os seguintes [4]:

- a) Rotor bloqueado;
- b) Desbalanceamento;
- c) Falta de fase.

Antes de descrever qualquer uma das condições que possam causar danos ao motor de indução, é importante compreender como as curvas de limites térmicos são construídas e quais são as suas limitações. As curvas de limites térmico são compostas de três parcelas e são apresentadas na Figura 19 [4]:

- (A) sobrecarga
- (B) aceleração
- (C) rotor bloqueado

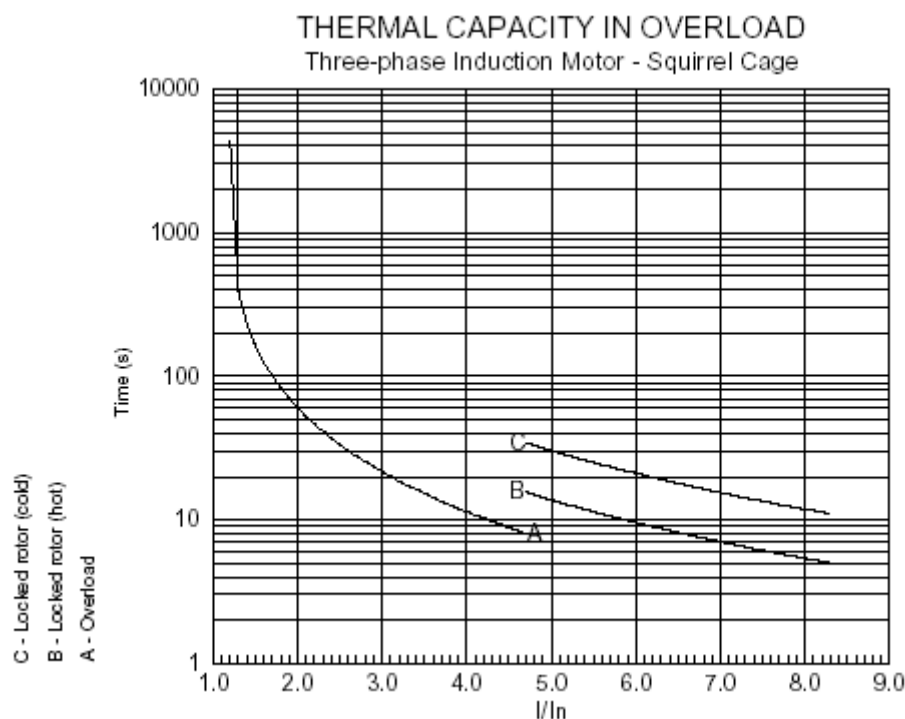


Figura 19 – Curva típica de limite térmico de um motor de indução trifásico

A parcela do rotor bloqueado cobre a faixa de corrente de rotor bloqueado em plena tensão a corrente de rotor bloqueado na mínima tensão permitida na partida.

A parcela de aceleração cobre a faixa de corrente de rotor bloqueado na mínima tensão de partida até a corrente correspondente à parada da carga. Esta parte da curva é útil se uma condição anormal acontece durante a partida e que impediria o motor a alcançar a velocidade nominal. Na maioria de aplicações estas condições anormais não são esperadas durante a aceleração.

A parcela de sobrecarga cobre a faixa de corrente correspondente à parada da carga a corrente de plena carga. Se as curvas de danos térmicos forem obtidas, é importante compreender que qualquer parte das curvas é limitada por um dos seguintes componentes do motor, junto com a temperatura inicial do componente.

a) Barra do rotor

A elevação de temperatura permitida para as barras do rotor é limitada pelo fato que a resistência do material é reduzida com o aumento da temperatura.

b) Conectores do rotor

A elevação de temperatura dos conectores do rotor é muito mais baixa do que das barras do rotor, a fim de limitar a flexão e o stress na barra. Isto vem da concepção e limitação da vida por fadiga e que o rotor de gaiola pode ser projetado para um certo numero de partidas acima da vida útil do motor.

c) Estator

A elevação de temperatura do estator é determinada pela classe do material de isolamento e sabendo que a cada 10°C acima do limite, a vida da isolamento reduz-se em 50%.

A elevação de temperatura calculada para as várias partes é baseada geralmente no aumento adiabática e a elevação é calculada na suposição de que todo o calor está armazenado na peça. Se o tempo de parada brusca ou o tempo da aceleração forem muito curtos, esta é uma boa suposição. Para longos tempos de aceleração, o calor da barra do rotor pode dissipar a todos as três áreas seguintes:

- Para a atmosfera por convecção;
- Para o ferro por condução;

- Para os conectores por condução (este terá um efeito de resfriamento na barra e de aquecimento no conector).

Assim, as curvas de limites térmicos baseados na suposição adiabática apresentam bons resultados, especial para tempos de aceleração curtos.

5.1 Rotor bloqueado ou tempo de aceleração

Infelizmente, não há nenhuma determinação uniforme relacionada ao número de paradas bruscas consecutivas. Entretanto, mais de uma parada brusca em um período muito curto seria altamente indesejável. A condição de parada brusca ou rotor bloqueado impõe uma sobrecarga extrema no motor de indução. A elevada corrente de rotor bloqueado faz com que toda a energia de entrada seja convertida em aquecimento do rotor e do estator.

O estator, as barras do rotor, e os anéis do rotor aquecem com diferentes valores, e o estator pode ficar em uma temperatura menor do que o limite de segurança, enquanto os anéis ou barras do rotor estão extremamente quentes ou vice-versa. Geralmente, os motores de indução pequenos são limitados pelo estator, quando os motores maiores são limitados pelo rotor. Cada motor tem um número de paradas bruscas que é determinado pelo projeto do motor, mas que varia com a tensão presente durante a parada. Por outro lado, o tempo de aceleração é essencialmente uma função do torque da carga e da inércia da carga e pode ser considerado inteiramente variável em cima do tipo de máquina ou de carga que está sendo solicitada.

5.2 Falta de fase

Quando a alimentação um motor trifásico se transforma em bifásica, diversas reações mecânicas e elétricas devido a essa ocorrência aparecem. O tipo de informação que se tem disponível para a utilização depende das circunstâncias que aconteceram antes da falta de fase. A seguir, descreve-se o comportamento de um motor de indução trifásico operando sob condição de falta de fase.

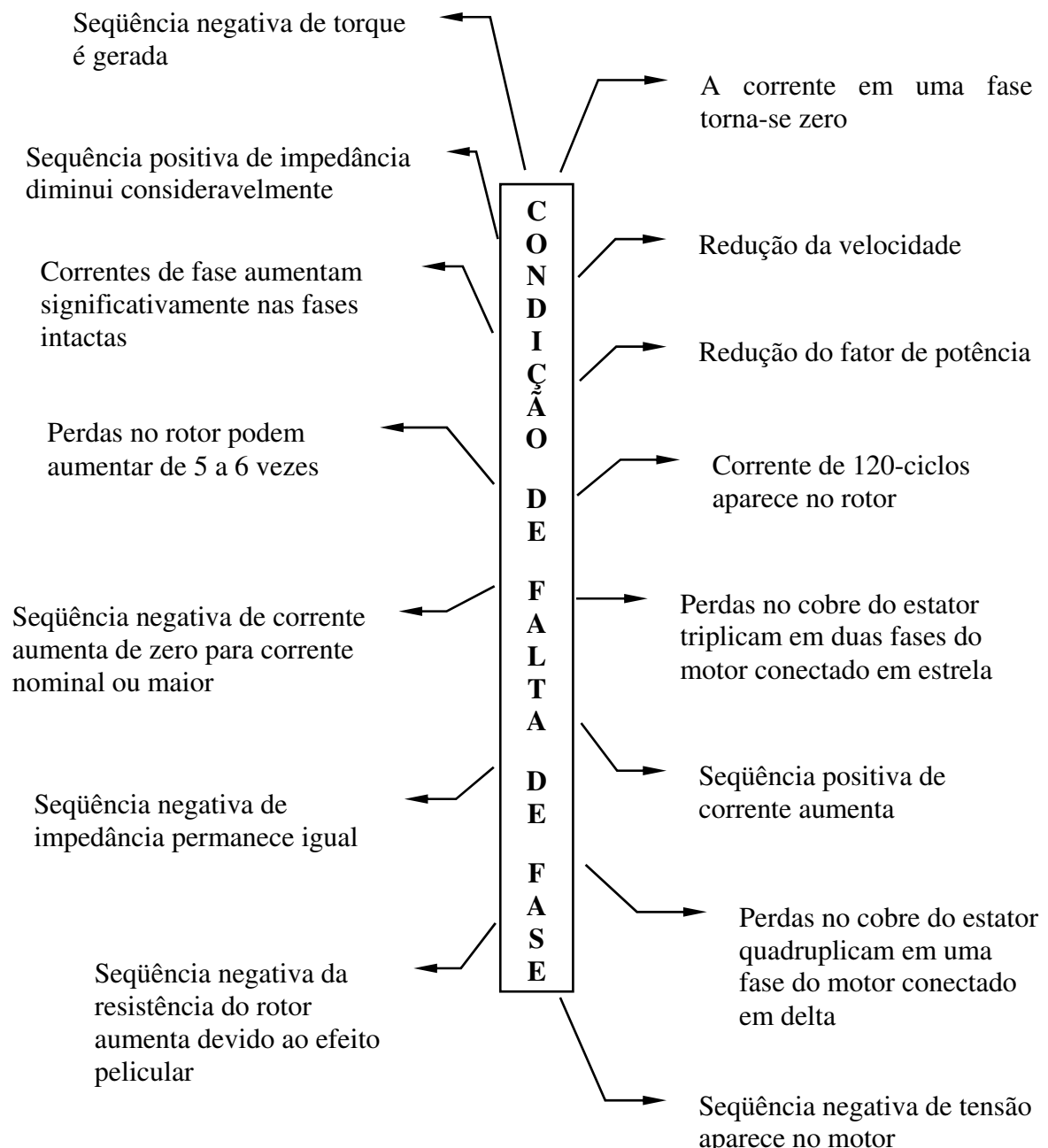


Figura 20 – Comportamento do motor sob condição de falta de fase

Os efeitos da falta de fase em motores elétricos trifásicos tem sido estudados juntamente com o uso frequente de motores grandes. Uma razão para o interesse crescente é que os motores maiores justificaram o investimento mais elevado na proteção. Os motores modernos, entretanto, requerem proteções mais sofisticadas, que requer por sua vez uma análise quantitativa mais complexa dos protetores do mercado [7].

Os resultados de estudos computacionais esperam ser úteis na determinação da necessidade do tipo de proteção do motor de indução trifásico contra os efeitos adversos de falta de fase [7].

Um motor de indução trifásico pode estar sujeito a diversas situações adversas impostas quando houver um desbalanceamento na tensão de alimentação. O caso extremo de desbalanceamento pode acontecer com a abertura de uma das fases dos condutores ou pela atuação de um fusível. Esta situação é conhecida como falta de fase. Sob esta circunstância, um fluxo girante é produzido no motor que trabalha em um sentido oposto aquele da rotação do rotor. Este fluxo girante contrário produzido pela falta de fase produz uma corrente muito próxima a 120Hz no rotor do motor de indução como um pequeno escorregamento [11].

Para entender melhor a falta de fase é conveniente o uso da ferramenta matemática chamada componentes simétricos. Esta ferramenta é usada no manuseio de condições complexas de tensão e correntes assimétricas (diferentes em módulo e ângulo) e decompor eles vetorialmente em componentes de sequências positiva, negativa e zero, e podendo assim analisar cada uma separadamente. No caso da falta de fase do motor, o circuito equivalente da sequência positiva pode ser desenhado adicionando o circuito de sequência negativa. Estes circuitos têm os elementos resistivos do rotor que têm valores ôhmicos diferentes nos circuitos de sequência positiva e negativa. A tensão e a corrente de sequência positiva são o que fazem o rotor girar em seu sentido normal. A tensão e a corrente de sequência negativa criam um torque negativo que gera um campo girante contrário de aproximadamente duas vezes a frequência de linha (120Hz) e causando o zumbido quando um motor está operando com falta de fase. A frequência de 120Hz induz correntes de sequência negativa no rotor e por causa do efeito pelicular, a resistência de sequência negativa do rotor é de três a oito vezes a resistência de sequência positiva do rotor. As correntes de sequência negativa do rotor produzem mais calor do rotor por ampere do que as correntes de sequência positiva do rotor porque a resistência do rotor é maior para correntes da sequência negativa do que para correntes da sequência positiva.

Do ponto de vista da proteção, o aquecimento do motor aumenta com o quadrado da corrente de sequência negativa, enquanto o relé de sobrecarga térmico que está no circuito do estator reage somente ao aumento da corrente de linha. Esta quantidade do aumento de calor no rotor pode causar o superaquecimento dos enrolamentos do estator especialmente em motores fechados com ventilação, onde uma proporção grande do calor gerado no rotor é dissipada através do estator. Considerando esse aumento de calor adicional durante a falta de fase, é sugerido que a curva de danos térmicos do motor fosse deslocada para a esquerda por um fator de $\sqrt{3/(1+k)}$, onde k é a relação da resistência de sequência negativa e positiva do rotor [8]. Tal deslocamento não pode ser justificado para nenhum motor na condição de rotor

bloqueado. Para comparar a elevação de temperatura do estator sob falta de fase, três testes podem ser realizados:

- Uma das fases do motor é desconectada enquanto o motor está funcionando e a carga é reduzida até a corrente de linha ficar igual a corrente de plena carga sob condição normal de operação trifásica. Mesmo que o aquecimento nas fases seja alto, o relé de sobrecarga térmico não atuará porque ele monitora corrente de linha.
- O Segundo teste é ligar o motor com 100% de carga sob condição trifásica normal. Depois de que a temperatura do motor estabiliza, desconecta-se uma das fases e monitora as temperaturas no estator com termopares.
- O terceiro teste usa o mesmo critério, mas ao invés de funcionar o motor com 100% de carga, opera o motor com 80% e monitora-se as temperaturas no estator com termopares.

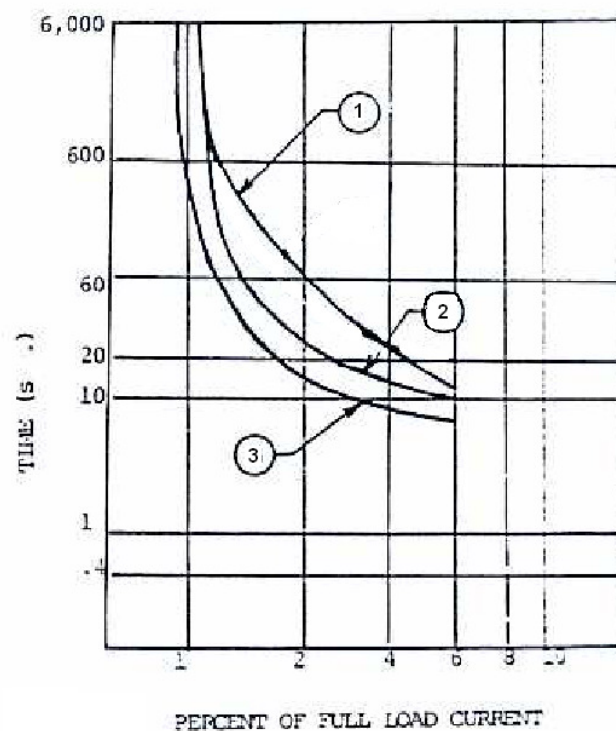


Figura 21 – Curvas tempo versus corrente para relés e motores

Curva 1 – Curva simplificada de danos térmicos do motor [4]

Curva 2 – Curva característica de um relé de sobrecarga térmico classe 10

Curva 3 – Curva característica acelerada (bipolar) de um relé de sobrecarga térmico classe 10

Relés de sobrecarga térmico com mecanismo diferencial efetuam o deslocamento de curva sugerido para prevenir falhas no motor durante a condição de falta de fase, Figura 21

[4]. Os testes acima mostram que os motores que funcionam com plena carga podem parar bruscamente quando a falta de fase ocorre. A corrente será muito similar a corrente de rotor bloqueado nesta condição e o aumento de temperatura será extremamente rápido.

Um outro teste foi realizado para medir a diferença da elevação de temperatura sob a condição de rotor bloqueado e tentando partir o motor com falta de fase. A condição de falta de fase gerou menor calor. Todos esses testes mostram que relés de sobrecarga térmico com curva característica acelerada protegem melhor o motor sob a condição de falta de fase.

6 Cálculo de tempo máximo permitido de motores operando em condições anormais

6.1 Tempo máximo permitido para rotor bloqueado

O tempo máximo de rotor bloqueado é um dado técnico do motor e sempre é fornecido pelo fabricante. Usualmente, a corrente de rotor bloqueado possui praticamente o mesmo valor da corrente de partida do motor e é fácil de determiná-la em testes, bem como o tempo máximo permitido para essa condição. Por essa razão, esta dissertação não irá estudar e calcular esse tempo.

6.2 Tempo máximo permitido para falta de fase

A máquina acionada retira do motor trifásico um determinado conjugado. Faltando uma fase o motor procura continuar fornecendo o mesmo conjugado anterior, ocasionando assim elevação da corrente de alimentação. Assim, um motor funcionando perante potência nominal e cujo regime de funcionamento é perturbado pelo desligamento de uma fase, passará a atuar dentro de uma das seguintes condições:

- Frenagem brusca, porque o motor não tem possibilidade de fornecer o conjugado exigido pela carga.
- Queda de rotação, porque o conjugado solicitado pela carga está abaixo do conjugado do motor.

Para o dimensionamento do sistema de proteção, é importante conhecer o tempo máximo permitido do motor em falta de fase, a fim de permitir a coordenação do sistema que atua na proteção do motor. O tempo máximo permitido em falta de fase é o período máximo de tempo que o motor pode funcionar, com uma fase desconectada, sem ocorrência de danos nos enrolamentos.

O tempo máximo permitido em falta de fase está diretamente relacionado com a máxima temperatura que pode ocorrer nos enrolamentos do motor, sem causar danos ao material isolante. Esta temperatura está, portanto, relacionada com a classe de temperatura do motor que, por sua vez, depende do material que constitui o sistema de isolamento dos condutores.

Conforme mostrado abaixo, a impedância equivalente do circuito pode ser determinada usando o circuito equivalente do motor de indução:

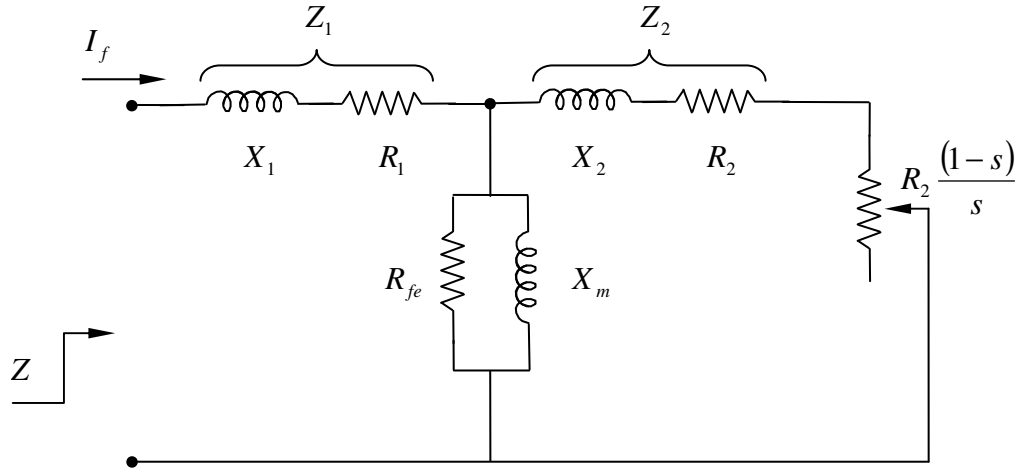


Figura 22 – Circuito equivalente do motor de indução

$$Z = \left[\left(\frac{R_2}{s} + jX_2 \right) \parallel \frac{R_{fe} \cdot jX_m}{R_{fe} + jX_m} \right] + R_1 + jX_1 \quad (\Omega) \quad (1)$$

Conforme pode-se verificar no circuito equivalente do motor de indução, se o escorregamento “ s ” aumenta, a impedância Z diminui, portanto:

$$I_f = \frac{U}{Z} \quad (A) \quad (2)$$

Com a ligação do motor em delta, ambas as fases da linha de alimentação ficam sobrecarregadas. Esta conclusão está baseada na simetria apresentada pelas conexões resultantes.

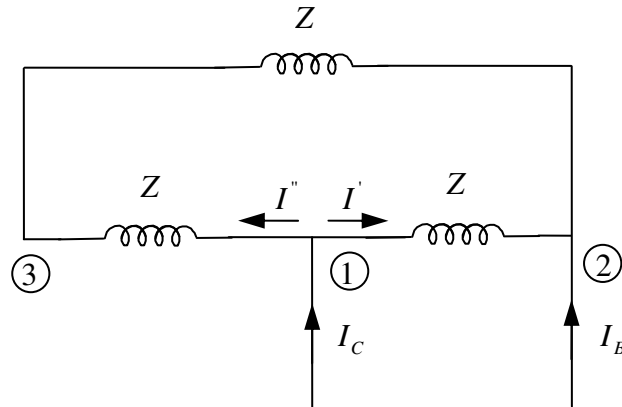


Figura 23 – Motor de indução trifásico conectado em delta com uma fase desconectada

Usando a mesma análise – se o escorregamento “ s ” aumenta, impedância “ Z ” diminui e a corrente “ I ” aumenta.

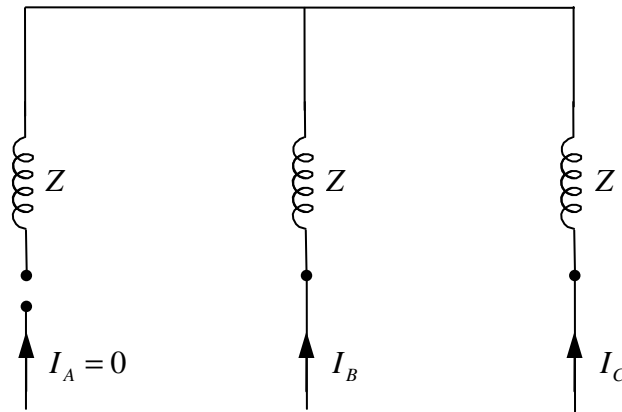


Figura 24 - Motor de indução trifásico conectado em estrela com uma fase desconectada

Logo, com o motor conectado em estrela, ambas as fases ficam sobrecarregadas e essa conclusão também é baseada na simetria das conexões resultantes.

Contudo, considerando a falta de fase no mesmo motor de indução e nas mesmas condições, o motor conectado em delta possui correntes de fase maior do que a corrente do motor conectado em estrela, conforme mostrado abaixo.

A Figura 25 apresenta o circuito equivalente do motor de indução trifásico conectado em delta e com uma fase desconectada.

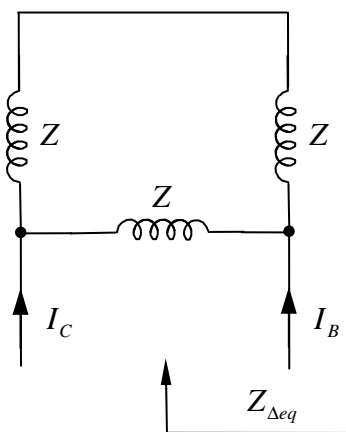


Figura 25 – Circuito equivalente do motor de indução trifásico conectado em delta e com uma fase desconectada

$$Z_{\Delta eq} = \frac{2xZxZ}{2xZ + Z} = \frac{2Z^2}{3Z}$$

$$\therefore Z_{\Delta eq} = \frac{2}{3} Z \quad (\Omega) \quad (3)$$

O circuito equivalente para um motor conectado em estrela e com uma fase desconectada é mostrado na Figura 26.

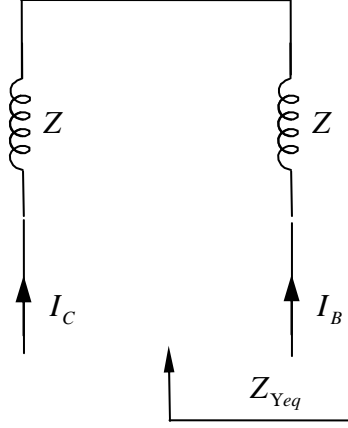


Figura 26 – Circuito equivalente do motor de indução trifásico conectado em estrela e com uma fase desconectada

$$Z_{Yeq} = 2Z \quad (\Omega) \quad (4)$$

O motor de indução pode ser conectado em delta ou estrela. Quando o motor é conectado em delta, a tensão de alimentação é “ U ” e quando o motor é conectado em estrela a tensão de alimentação é “ $U\sqrt{3}$ ”, portanto:

Motor conectado em delta:

$$I_{1\Delta \sin gle-phasin g} = \frac{U}{Z_{\Delta eq}} = \frac{U}{Z \frac{2}{3}} = \frac{3}{2} \frac{U}{Z}$$

$$\therefore I_{1\Delta \sin gle-phasin g} = 1.5 \frac{U}{Z} \quad (A) \quad (5)$$

Motor conectado em estrela:

$$I_{1Y \sin gle-phasin g} = \frac{U\sqrt{3}}{Z_{Yeq}} = \frac{U\sqrt{3}}{2Z}$$

$$\therefore I_{1Y \sin gle-phasing} = 0.866 \frac{U}{Z} \quad (A) \quad (6)$$

Comparando as equações (5) e (6), obtém-se:

$$I_{1\Delta \sin gle-phasing} > I_{1Y \sin gle-phasing}$$

Como a corrente em falta de fase do motor de indução trifásico conectado em delta é maior que a corrente em falta de fase do motor de indução trifásico conectado em estrela, conclui-se que a pior situação de falta de fase é quando no motor está conectado em delta.

Com isso, os estudos e avaliações seguintes irão ser realizados na pior situação, isto é, considerando o motor de indução trifásico conectado em delta.

6.3 Cálculo do tempo máximo permitido em falta de fase

A pior condição de tempo máximo permitido do motor em falta de fase, motor de indução trifásico conectado em delta, será usado para os cálculos.

6.3.1 Motor de indução trifásico conectado em delta

Cálculo das perdas que geram calor

a) Perda Joule no estator:

$$P_{j_1} = \left(\frac{2}{3} I_1 \right)^2 R_1 + 2 \left(\frac{I_1}{3} \right)^2 R_1 \quad (W) \quad (7)$$

Usando o circuito equivalente do motor de indução trifásico conectado em delta e com uma fase desconectada, Figura 25, tem-se:

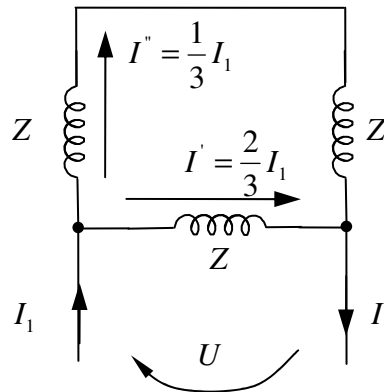


Figura 27 – Circuito equivalente do motor de indução trifásico conectado em delta e com uma fase desconectada

Onde:

I_1 – Corrente que passa pelos terminais de alimentação:

$$I' = \frac{2Z}{2Z + Z} I_1 \quad (A) \quad (8)$$

$$\therefore I' = \frac{2}{3} I_1 \quad (A)$$

$$I'' = \frac{Z}{(2Z + Z)} I_1 \quad (A) \quad (9)$$

$$\therefore I'' = \frac{1}{3} I_1 \quad (A)$$

O aumento de corrente na linha de alimentação para uma determinada carga é:

$$P_{a3\phi} = \sqrt{3}UI \cos \phi \quad (W) \quad (10)$$

$$I = \frac{P_{a3\phi}}{\sqrt{3}U \cos \phi} \quad (A) \quad (11)$$

Onde: I = corrente de linha com as três fases conectadas:

$$P_{a2\phi} = I'U \cos \phi + 2I'' \frac{U}{2} \cos \phi \quad (W) \quad (12)$$

Substituindo as equações (8) e (9) na equação (12), obtém-se:

$$P_{a2\phi} = \frac{2}{3} I_1 \cdot U \cdot \cos \phi + \frac{1}{3} I_1 \cdot U \cdot \cos \phi$$

Rearranjando a equação, tem-se:

$$P_{a2\phi} = I_1 U \cos \phi \quad (W) \quad (13)$$

$$\therefore I_1 = \frac{P_{a2\phi}}{U \cos \phi} \quad (A) \quad (14)$$

Supondo $P_{a3\phi} = P_{a2\phi}$, então:

$$I_1 = \frac{P_{a3\phi}}{U \cos \phi} = \frac{\sqrt{3}UI \cos \phi}{U \cos \phi}$$

$$I_1 = \sqrt{3}I \quad (A) \quad (15)$$

Considerando:

$$I' = \frac{2}{3}I_1 = \frac{2}{3}\sqrt{3}I$$

$$\therefore I' = \frac{2}{3}\sqrt{3}I \quad (A) \quad (16)$$

Com as três fases conectadas, a corrente de fase é:

$$I_f = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

A sobre corrente no enrolamento com tensão nominal quando uma fase está desconectada será:

$$\frac{I'}{I_f} = \frac{\frac{2}{3}\sqrt{3}I}{\frac{I}{\sqrt{3}}}$$

$$\therefore I' = 2I_f \quad (A) \quad (17)$$

Substituindo a equação (15) em (7), obtém-se:

$$Pj_1 = \left(\frac{2}{3}\sqrt{3}I \right)^2 R_1 + 2 \left(\frac{\sqrt{3}}{3}I \right)^2 R_1$$

$$Pj_1 = 2I^2 R_1 \quad (W) \quad (19)$$

b) Perdas Joule no rotor:

$$P_{j_2} = \left(\frac{2}{3} I_2\right)^2 R_2 + 2 \left(\frac{I_2}{3}\right)^2 R_2 \quad (W) \quad (19)$$

$$I_2 = \sqrt{3} I_2' \quad (A) \quad (20)$$

Onde:

I_2 - Corrente rotórica referida ao estator com uma fase desconectada

I_2' - Corrente rotórica referida ao estator com três fases conectadas

$$I_2' = \sqrt{(I \cos \phi - I_0 \cos \phi_0)^2 + (I \sin \phi - I_0 \sin \phi_0)^2} \quad (A) \quad (21)$$

Substituindo a equação (20) em (19), tem-se:

$$P_{j_2} = \left(\frac{2}{3} \sqrt{3} I_2'\right)^2 R_2 + 2 \left(\frac{\sqrt{3} I_2'}{3}\right)^2 R_2$$

$$P_{j_2} = 2 \cdot (I_2')^2 R_2 \quad (W)$$

Onde:

$$R_2 = \frac{P_{j_{2\phi}}}{(I_2')^2} \quad (\Omega) \quad (22)$$

$$P_{j_{2\phi}} = \frac{(P_u + p_{mec} + p_{s_{3\phi}})s}{(1-s)} \quad (W) \quad (23)$$

Portanto:

$$P_{j_2} = 2 \cdot (I_2')^2 \cdot \frac{(P_u + p_{mec} + p_{s_{3\phi}})s}{(1-s) \cdot (I_2')^2} \quad (W) \quad (24)$$

c) Perdas no ferro:

$$p_{fe} = p_{fe0} \left(\frac{U}{U} \right)^2 + 2p_{fe0} \left(\frac{U/2}{U} \right)^2 \quad (W) \quad (25)$$

$$p_{fe} = p_{fe0} + \frac{p_{fe0}}{2}$$

$$p_{fe} = 1.5 p_{fe0} \quad (W) \quad (26)$$

$$p_{fe0(3\phi)} = 3 p_{fe0}$$

$$\therefore p_{fe} = 1.5 \frac{p_{fe0(3\phi)}}{3} = \frac{p_{fe0}}{2} \quad (W) \quad (27)$$

Onde:

p_{fe0} - Perdas no ferro a vazio referente a uma fase

$p_{fe0(3\phi)}$ - Perdas no ferro a vazio nas três fases

d) Perdas suplementares:

$$p_s = \frac{1}{100} U \frac{2}{3} I_1 + 2 \frac{1}{100} U \frac{1}{3} I_1 \quad (W) \quad (28)$$

$$p_s = \frac{1.33}{100} U I_1 \quad (W) \quad (29)$$

$$p_s = \frac{1.33}{100} U \sqrt{3} I$$

$$p_s = 0.0231 U I_1 \quad (W) \quad (30)$$

e) Somatória das perdas no motor de indução:

$$\sum p_{heat} = p_{j1} + p_{j2} + p_{fe} + p_s \quad (W) \quad (31)$$

Este valor da somatória das perdas é um valor médio correspondente a uma distribuição uniforme de calor nos três enrolamentos de fase. A sobrecarga devido à falta de

uma fase aparece sobre um enrolamento de fase, concentrando a quase totalidade das perdas geradas sobre esse enrolamento, logo:

$$\sum p'_{heat} = \left(\frac{\text{Total number of phase windings of motor}}{\text{Number of phase windings overloaded}} \right) \cdot \sum p_{heat} \quad (W) \quad (32)$$

$$\sum p'_{heat} = \left(\frac{3}{1} \right) \cdot \sum p_{heat} = 3 \cdot \sum p_{heat} \pm \vartheta(p) \quad (W) \quad (33)$$

6.3.2 Cálculo da elevação de temperatura

Em todas as partes de uma máquina elétrica onde existam perdas, gera-se calor e consequentemente elevação de temperatura. Por causa dessa elevação de temperatura, cria-se um desequilíbrio térmico entre as partes aquecidas e o ambiente, onde uma parte do calor produzido é fornecida ao ambiente.

A sobre elevação de temperatura de um elemento da máquina é inversamente proporcional à superfície de dissipação de calor, dependendo ainda do material usado e das condições de ventilação. Nos motores de indução trifásico padrões, a ventilação é proporcional à velocidade do rotor.

A relação entre a potência total perdida e a superfície de dissipação, fornece a quantidade em “watts perdidos” que correspondem a uma unidade de superfície de dissipação. Esta relação representa o aquecimento do elemento considerado e deve estar contida entre determinados limites.

Superfície externa e interna do núcleo, superfícies frontais do núcleo e a superfície dos canais de ventilação são consideradas no cálculo da superfície de dissipação.

$$\therefore S = \pi \cdot L(d_e + d_i) = \frac{\pi}{4} \cdot (d_e^2 - d_i^2) \cdot (C + 2) \quad (cm^2) \quad (34)$$

Conhecendo a superfície de dissipação, pode-se calcular a quantidade de “watts dissipados” por centímetro quadrado.

$$\left(\frac{W}{cm^2} \right) = \frac{\sum p'_{heat}}{S} \quad (W/cm^2) \quad (35)$$

A sobre elevação de temperatura do estator pode ser calculada conforme abaixo:

$$\Delta T_f = q \cdot \frac{\left(\frac{W}{cm^2} \right)}{(1 + 0.1v)} \quad (^\circ C) \quad (36)$$

Onde:

$$v = \frac{\pi D n}{60} \quad (m/sec) \quad (37)$$

$$\therefore \Delta T_f = q \cdot \frac{\frac{W}{cm^2}}{\left(1 + 0.1 \frac{\pi D n}{60}\right)} \pm \vartheta(\Delta T) \quad (^\circ C) \quad (38)$$

Onde, q é o coeficiente de ventilação. Para motores de indução com boa ventilação $q = 360$ e para motores de indução com má ventilação $q = 540$.

6.3.3 Cálculo teórico do tempo máximo permitido em falta de fase

De acordo com manual de cálculo de ensaio de protótipos de motor de indução trifásico, a seguinte equação pode ser obtida:

$$\tau = \frac{-t}{\ln\left(\frac{T_f - T(t)}{T_f - T_0}\right)} \quad (min) \quad (40)$$

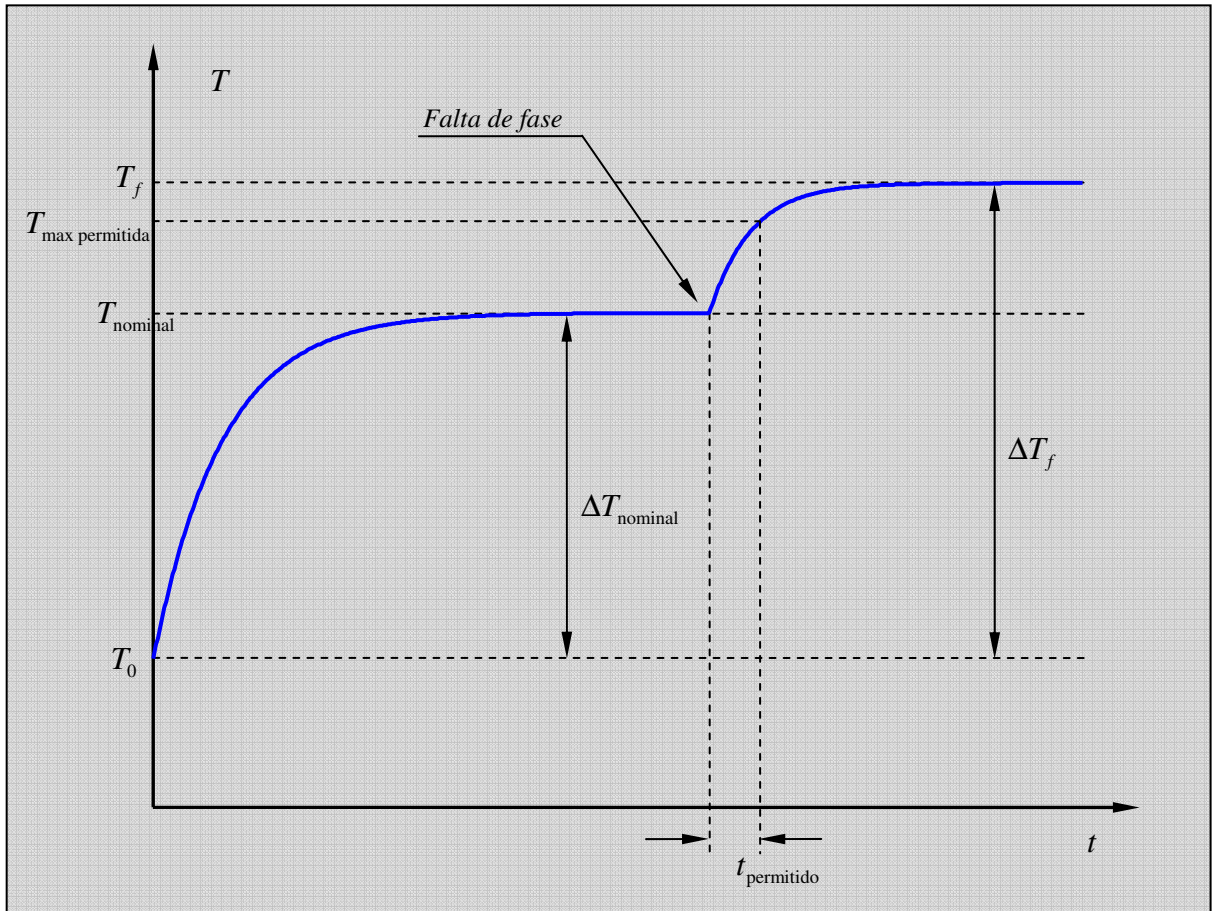


Figura 28 – Elevação de temperatura do motor de indução trifásico em condição normal e após a falta de fase

$$T_f = \Delta T_f + T_0 \quad (^{\circ}C) \quad (41)$$

$$\therefore t_{\lim} = -\tau \cdot \ln \left(\frac{T_f - T_{\max \text{ permissible}}}{T_f - T_0} \right) \quad (^{\circ}C)$$

$$t_{\lim} = -\tau \cdot \ln \left(\frac{\Delta T_f + T_0 - T_{\max \text{ permissible}}}{\Delta T_f - T_0} \right) \pm \vartheta(t) \quad (\text{min}) \quad (42)$$

Onde, $T_{\max \text{ permitida}}$ é a temperatura máxima permitida da isolação do enrolamento.

Conhecendo as condições e parâmetros envolvidos no funcionamento do motor em falta de fase, é possível calcular teoricamente o tempo máximo permitido em falta de fase como mostrado na equação (42).

O motor de indução trifásico de 11kW 380V 60Hz fabricado pela WEG foi escolhido para o calculo teórico do tempo máximo permitido em falta de fase. 11kW em 380V 60Hz é uma das potências de motores de indução mais utilizados em aplicações industriais e seus principais dados técnicos elétricos e mecânicos são apresentados na Tabela 4.

Dados técnicos			
Potência nominal	(kW)	11	
Número de pólos		IV	
Carcaça		132M	
Tensão nominal	(V)	380 ± 3	
Frequência nominal	(Hz)	60	
Fator de serviço		1,15	
Corrente nominal	I (A)	22,80 ± 0,05	
Corrente a vazio	I_0 (A)	10,28 ± 0,10	
Resistência do estator por fase	R_l (Ω)	0,42 ± 0,01	
Cos φ		0,858 ± 0,005	
Sen φ		0,514 ± 0,005	
Cos φ ₀		0,096 ± 0,005	
Sen φ ₀		0,995 ± 0,005	

Perdas no ferro sem carga nas três fases	$P_{fe0(3\phi)}$	(W)	396,92 ± 2,31
Perdas suplementares	p_s	(W)	109,35 ± 1,64
Perdas mecânicas	p_{mec}	(W)	116,32 ± 1,74
Potência útil	P_u	(W)	12588,21±188,82
escorregamento	s	(%)	2,5 ± 0,1
Diâmetro externo do estator	d_e	(cm)	22,0 ± 0,2
Diâmetro interno do estator	d_i	(cm)	15,0 ± 0,2
Número de canais de ventilação	C		0
Comprimento do pacote	L	(cm)	15,0 ± 0,2
Diâmetro externo do rotor	D	(cm)	0,149 ± 0,005
Coeficiente de ventilação	q		450
Rotação nominal	n	(rpm)	1755 ± 5
Constante de tempo de aquecimento (para carcaça 132M)	τ	(min)	20,64 ± 0,05
Temperatura ambiente máxima	T_0	(°C)	40
Temperatura máxima permitida da isolação do enrolamento	T_{lim}	(°C)	130

Tabela 4 – Principais especificações elétricas e mecânicas do motor de indução trifásico de 11kW 380V 60Hz

Usando as equações do capítulo 6, os parâmetros da Tabela 4 e realizando avaliações de incerteza de medições indiretas com grandezas não correlacionadas, os seguintes valores são calculados.

$$\sum p_{heat} = p_{j1} + p_{j2} + p_{fe} + p_s \quad (W) \quad (31)$$

Onde:

$$P_{j1} = 2I^2 R_1 \quad (W) \quad (19)$$

$$P_{j1} = 2(22.8)^2 0.42947 \quad (W)$$

$$P_{j1} = 446.51 \pm 10.81 \quad (W)$$

$$P_{j2} = 2.(I_2')^2 \cdot \frac{(P_u + p_{mec} + p_s)s}{(1-s).(I_2')^2} \quad (W) \quad (24)$$

$$I_2' = \sqrt{(I \cos \phi - I_0 \cos \phi_0)^2 + (I \sin \phi - I_0 \sin \phi_0)^2} \quad (A) \quad (21)$$

$$\therefore I_2' = 18.63 \pm 0.16 \quad (A)$$

$$P_{j_2} = 2.(18.63)^2 \cdot \frac{(12588.21 + 116.32 + 109.35).0.025}{(1 - 0.025).(18.63)^2} \quad (W)$$

$$P_{j_2} = 657.12 \pm 22.47 \quad (W)$$

$$p_{fe} = \frac{P_{fe0}}{2} \quad (W) \quad (27)$$

$$p_{fe} = \frac{396.92}{2} = 198.46 \pm 2.31 \quad (W)$$

$$p_s = 0.0231.U.I_1 \quad (W) \quad (30)$$

$$p_s = 0.0231.380.22.8 = 200.13 \pm 1.80 \quad (W)$$

Portanto,

$$\sum p_{heat} = p_{j1} + p_{j2} + p_{fe} + p_s \quad (W) \quad (31)$$

$$\sum p_{heat} = 1502.23 \pm 25.00 \quad (W)$$

e,

$$\sum p_{heat}' = 3 \cdot \sum p_{heat} \quad (W) \quad (33)$$

$$\sum p_{heat}' = 4506.69 \pm 25.00 \quad (W)$$

É necessário conhecer a superfície de dissipação do motor, que depende de dimensões de projeto do motor para calcular a quantidade de “watts dissipado” por centímetro quadrado pelo motor de indução trifásico selecionado.

$$S = \pi.L(d_e + d_i) = \frac{\pi}{4} \cdot (d_e^2 - d_i^2) \cdot (C + 2) \quad (cm^2) \quad (34)$$

$$S = \pi.15(22 + 15) = \frac{\pi}{4} \cdot (22^2 - 15^2) \cdot (0 + 2) \quad (cm^2)$$

$$S = 2150.42 \pm 40.42 \quad (cm^2)$$

Deste modo, a quantidade de “watts dissipado” por centímetro quadrado pode ser calculado como mostrado abaixo.

$$\left(\frac{W}{cm^2}\right) = \frac{\sum p_{heat}}{S} \quad \left(\frac{W}{cm^2}\right) \quad (35)$$

$$\left(\frac{W}{cm^2}\right) = \frac{4506.69}{2150.42} = 2.096 \pm 0.041 \quad \left(\frac{W}{cm^2}\right)$$

O ultimo passo para determinar o tempo máximo permitido em falta de fase para motor de 11kW é calcular o sobre-aquecimento do estator.

$$\Delta T_f = q \cdot \frac{\frac{W}{cm^2}}{\left(1 + 0.1 \frac{\pi D n}{60}\right)} \quad (^\circ C) \quad (38)$$

$$\Delta T_f = 450 \cdot \frac{2.096}{\left(1 + 0.1 \frac{\pi 0.149 \cdot 1755}{60}\right)} \quad (^\circ C)$$

$$\Delta T_f = 398.37 \pm 8.23 \quad (^\circ C)$$

Portanto,

$$t_{lim} = -\tau \cdot \ln \left(\frac{\Delta T_f + T_0 - T_{max \text{ permissible}}}{\Delta T_f - T_0} \right) \quad (\text{min}) \quad (42)$$

$$t_{lim} = -20.64 \cdot \ln \left(\frac{398.37 + 40 - 130}{40 - 130} \right) \quad (\text{min})$$

$$t_{lim} = 3.10 \pm 0.06 \quad (\text{min})$$

O tempo teórico máximo permitido em falta de fase, calculado acima, será comparado e avaliado com o tempo máximo permitido em falta de fase que será encontrado através dos testes experimentais.

7 Estudo do dispositivo de proteção contra falta de fase

7.1 Relés de sobrecarga

Relés de sobrecarga tradicionais são relés de sobrecarga que funcionam pelo princípio dos bimetálicos. A corrente é conduzida diretamente pelas resistências de aquecimento ou enrolamentos do bimetálico e a deflexão do bimetálico depende da corrente. As plaquetas deslizantes (*sliders*) movimentam-se atuando na alavanca diferencial e comutando os contatos auxiliares. Deste modo, os bimetálicos atuam como sistema de medição e atuador. Este sistema apenas faz proteção contra sobrecarga e é sensível a falta de fase.

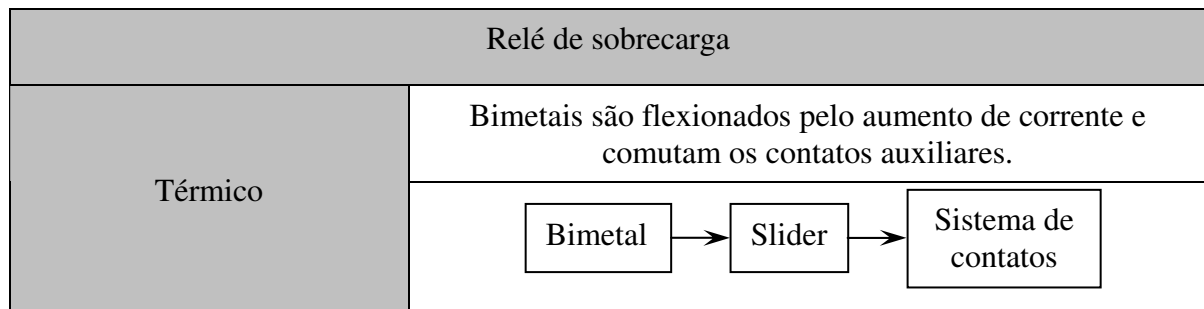


Tabela 5 – Visão geral do relé de sobrecarga térmico

Estes sistemas possuem uma estrutura linear como mostrado na Tabela 5. A energia elétrica é transformada em força mecânica. O resultado do deslocamento / deflexão comuta um par de contatos.

7.2 Proteção de motor com relés de sobrecarga térmico

7.2.1 Relés de sobrecarga térmico sem sensibilidade a falta de fase

As características tripolar de um relé de sobrecarga baseiam-se que todos os três pólos estejam previamente carregados igualmente (condição a quente).

Sob essas condições, os dados de disparo do relé de sobrecarga, podem ser vistos na Tabela 6, com temperatura ambiente em 20°C, carga de 1,2 vezes a corrente ajustada e disparando em até 2 horas.

Relé de sobrecarga	Tipo 1			Temperatura ambiente
		A	B	Valores de referencia °C
Compensação de temperatura	1,05	1,2		+20
	1,05	1,3		-5
	1	1,2		+40

Tabela 6 – Todos os pólos carregados igualmente

Relé de sobrecarga	Tipo 1			Temperatura ambiente
		A	B	Valores de referencia °C
Compensação de temperatura	1,05	1,32		+20

Tabela 7 – Apenas dois pólos carregados

Relé de sobrecarga	Tipo 1			Temperatura ambiente
		A	B	Valores de referencia °C
Compensação de temperatura	2 pólos: 1,0	2 pólos: 1,15		+20
	1 pólo: 0,9	1 pólo: 0		

Tabela 8 – Relé de sobrecarga com sensibilidade a falta de fase com pólos carregados não igualmente

Para relés sem sensibilidade a falta de fase, e com apenas 2 pólos carregados, a corrente precisa aumentar para 1,32 vezes a corrente ajustada, aproximadamente 10%, para disparar em até 2 horas, como mostrado na Tabela 7.

Esta declaração da VDE 0660 considera o fato que, onde motores trifásicos continuam funcionando com 2 fases, dois bimetálicos devem produzir força suficiente para atuar o mecanismo de disparo. A característica bipolar - curva 1 da Figura 29 – de um relé de sobrecarga sem sensibilidade a falta de fase, irá posicionar-se acima da curva característica tripolar (curva 2 da Figura 29).

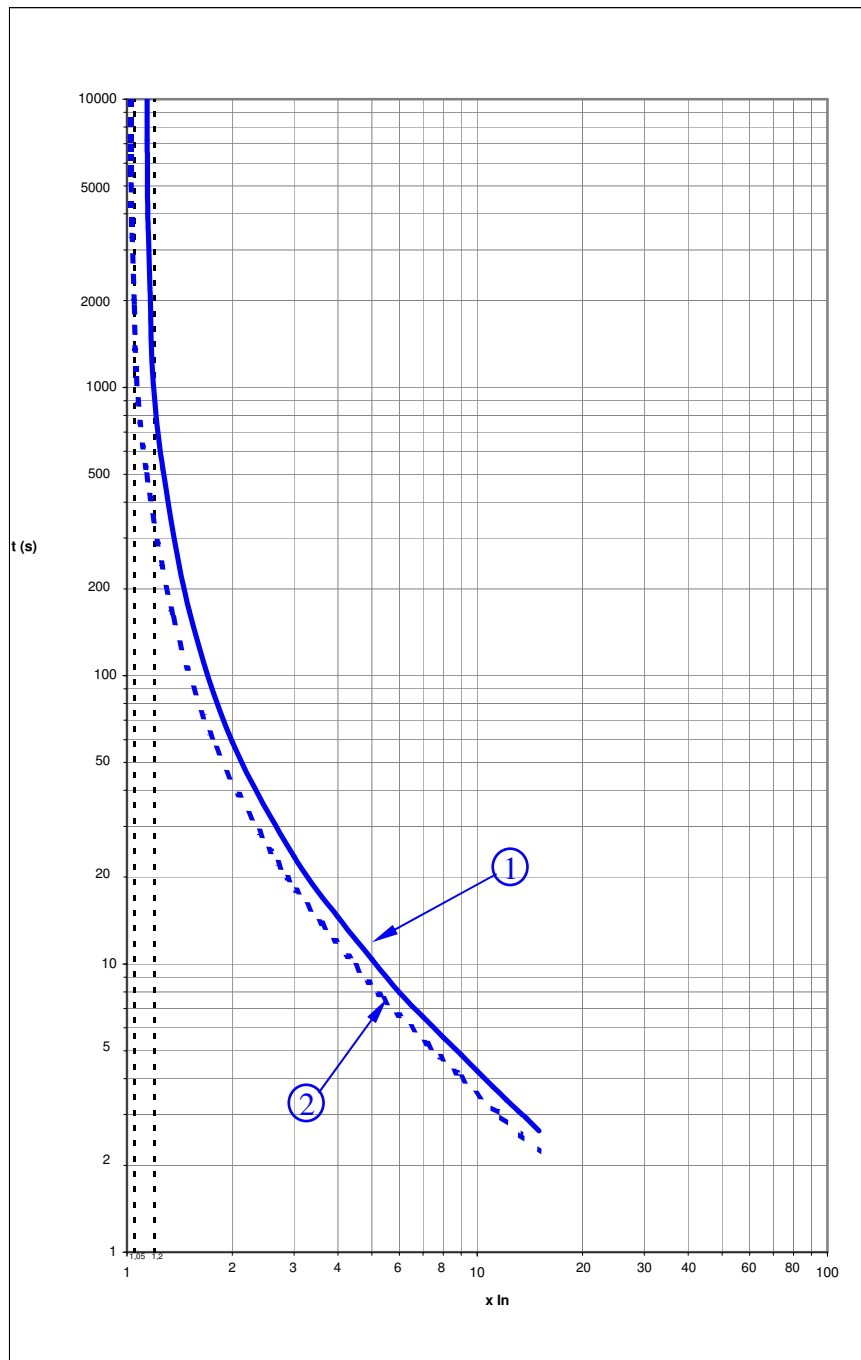


Figura 29 – Curvas características do relé de sobrecarga térmico tripolar

- 1: Curva característica bipolar;
- 2: Curva característica tripolar.

7.2.2 Relés de sobrecarga térmico com sensibilidade a falta de fase

Com a inclusão de um mecanismo diferencial na parte principal do relé de sobrecarga térmico, um efeito de disparo antecipado em relação ao com carga tripolar é produzido com uma carga bipolar. A corrente ajustada é reduzida, o que significa que com a mesma corrente o tempo de disparo seja menor, ou o mesmo tempo de disparo pode ser alcançado com uma menor corrente ajustada.

Por exemplo: para uma corrente de $1,5 \times I_n$, o tempo de disparo é:

2,8 min – com todos os três pólos do relé de sobrecarga carregados, com ou sem sensibilidade a falta de fase.

6,0 min – com dois pólos carregados do relé de sobrecarga sem sensibilidade a falta de fase

1,2 min – com dois pólos carregados do relé de sobrecarga com sensibilidade a falta de fase

O que significa que um motor que funciona com uma falta de fase é protegido quando utilizados relés de sobrecarga térmico com sensibilidade a falta de fase.

Motores com potência nominal menor do que 15kW, e não expostos à falhas de falta de fase, identificam a falta mais rapidamente e protege-se com a utilização de um relé de sobrecarga térmico com sensibilidade à falta de fase.

Adicionalmente, o relé de sobrecarga com sensibilidade a falta de fase atende as exigências de proteção de motores classe Ex(e) (a prova de explosão), e fornece proteção total sob condição de falta de fase.

7.2.3 Funcionamento do mecanismo diferencial – sensibilidade à falta de fase.

Os relés de sobrecarga sem sensibilidade a falta de fase são equipados com apenas um *slider*. Este *slider* posiciona-se em frente aos bimetálicos, e transmite seu movimento para o mecanismo de disparo.

Relés de sobrecarga com sensibilidade a falta de fase utilizam adicionalmente um segundo *slider* que se posiciona atrás dos bimetálicos. Este é conectado, via um braço de alavanca duplo (3), Figura 30 – posição (a) [24], para o mecanismo de disparo.

Sob a condição de sobrecarga tripolar, Figura 30 – posição (b) [24], todos os três bimetálicos se movem de seus estados a frio, posição “k”, para a posição a quente “w₃”. Esse movimento dos bimetálicos para a direita é feito sem interferência do *slider* 2 e assim a alavanca 3 movimenta-se correspondentemente. O deslocamento resultante s_2 da alavanca 3 e os *sliders* 1 e 2 é igual ao deslocamento s_1 dos bimetálicos, até atingir o ponto de disparo S.

Com um dos bimetálicos não aquecidos na condição bipolar, Figura 30 – posição (c) [24], o movimento do *slider* 2 é impedido. O braço de alavanca 3 desloca-se até a posição S, empurrada pelo deslocamento de dois bimetálicos aquecidos até a posição de aquecimento bipolar w_2 que também desloca s_2 à distância da alavanca 3. Com isso, a curva característica de disparo bipolar posiciona-se abaixo da curva característica tripolar. Isto mostra que a condição de sobrecarga bipolar é detectada e disparada mais rápida pelo relé de sobrecarga térmico com sensibilidade à falta de fase comparando com a condição de sobrecarga tripolar.

Se a falta de fase acontecer durante a operação de carregamento tripolar do relé de sobrecarga térmico com sensibilidade a falta de fase, o bimetetal afetado esfriará. Em isso acontecendo, seu movimento será em direção ao estado frio, movendo o *slider 2* correspondentemente. Nessa situação o disparo do relé também acontece.

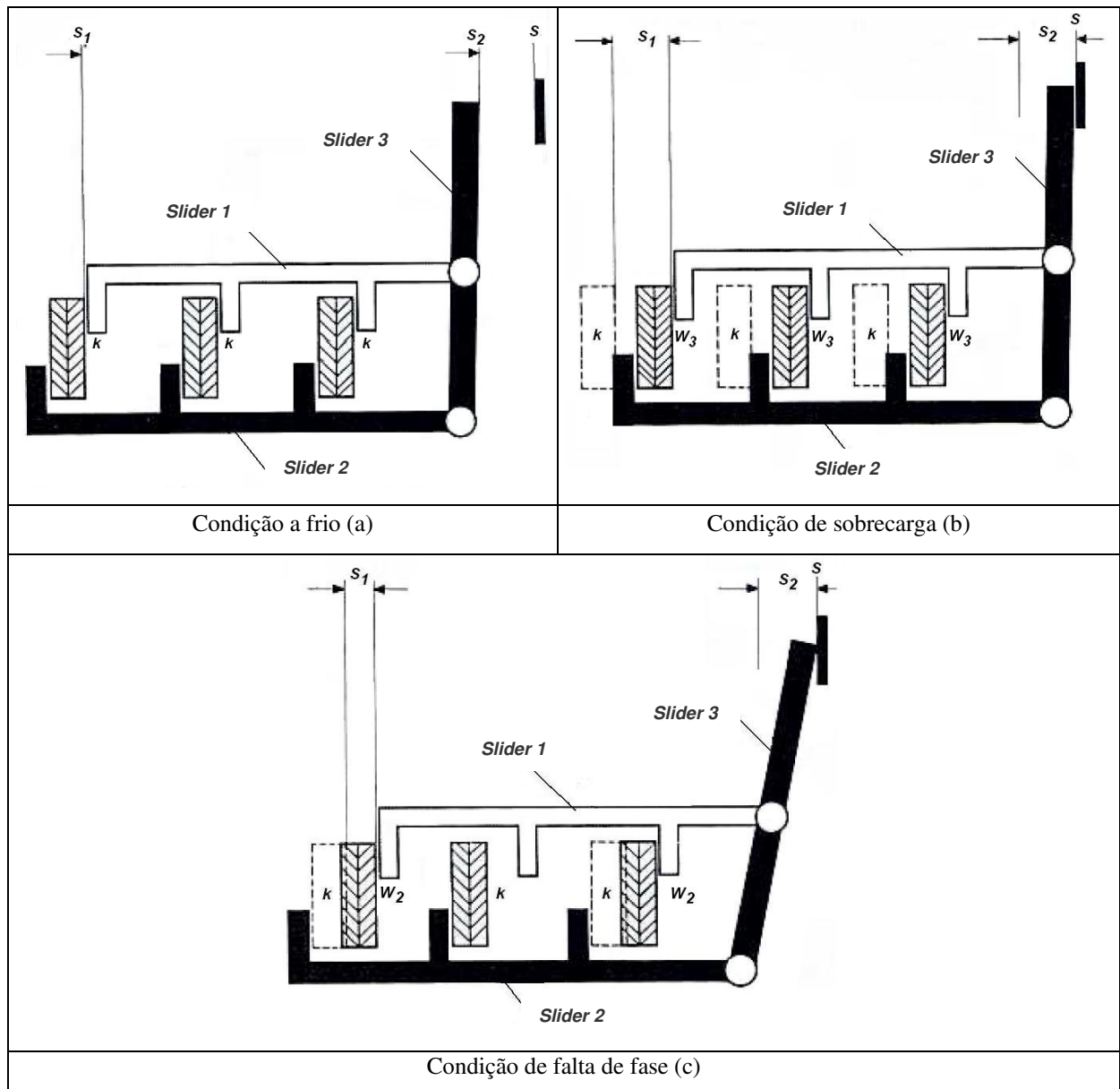


Figura 30 – Funcionamento do mecanismo diferencial do relé de sobrecarga térmico com sensibilidade a falta de fase

8 Aparelhagem experimental

Para um melhor entendimento dos sistemas físicos em estudo é de suma importância o conhecimento de seus comportamentos e fatores que estão relacionados. Deste modo, alguns testes experimentais são necessários.

Os capítulos 8 e 9 descrevem os materiais e procedimentos usados nesse trabalho, de modo a permitir a comparação dos resultados obtidos com os valores calculados de tempo máximo permitido do motor em falta de fase e a avaliação da proteção do motor de indução contra as operações sob condições anormais pelo uso do relé de sobrecarga térmico com sensibilidade a falta de fase

Os testes a seguir foram realizados:

- Teste de determinação das curvas características do relé de sobrecarga térmico WEG;
- Teste de elevação de temperatura do motor WEG (11kW em 380V/60Hz) operando sob condição normal;
- Teste de elevação de temperatura do motor WEG (11kW em 380V/60Hz) operando sob condição anormal: rotor bloqueado e
- Teste de elevação de temperatura do motor WEG (11kW em 380V/60Hz) operando sob condição anormal: falta de fase.

Os aparelhos utilizados nos testes de determinação das curvas características e elevação de temperatura são mostrados nesse capítulo.

8.1 Motor de indução trifásico

O motor utilizado para os testes foi o mesmo motor de indução trifásico escolhido para o cálculo teórico do tempo máximo permitido em falta de fase, Figura 31, com especificações nominais como mostrado abaixo:

Modelo: 132M 032002	
- Potência nominal: 11kW (15HP)	- Corrente nominal: 22,8 A
- Número de pólos: 4 pólos	- Grau de proteção: IP55
- Tensão nominal: 380 V	- Classe do isolamento: B
- Frequência: 60Hz	- Fator de serviço: 1,15
- Rotação nominal: 1755 rpm	- Carcaça: 132M

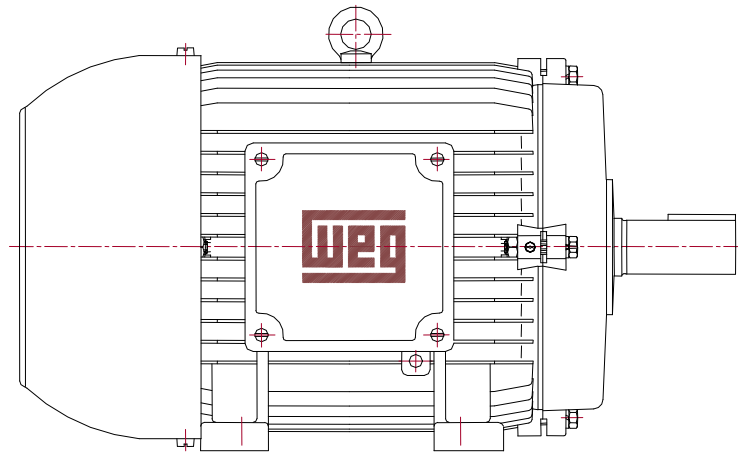


Figura 31 – Motor de indução trifásico – 11kW 380V 60Hz

O dispositivo de proteção térmico correspondente – relé de sobrecarga térmico – linha RWD, foi selecionado depois da escolha do motor de indução.

8.2 Relé de sobrecarga térmico

Os relés de sobrecarga são utilizados para proteção de equipamentos elétricos, tais como motores trifásicos, contra sobre-aquecimento.

Como mostrado no capítulo anterior, o sobre-aquecimento nos motores pode ser causado por fatores mecânicos e elétricos e em todos os casos, o aumento de corrente sentida pelo motor é monitorado em todas as fases pelo relé de sobrecarga.

Os relés de sobrecarga térmico, que são dependentes de corrente e cujas funções incluem disparo retardado, funcionam devido ao efeito do aquecimento pelo fluxo de corrente através dos bimetais.

O valor de ajuste de corrente do relé de sobrecarga (valor entre a faixa de ajuste menor e maior do relé de sobrecarga térmico) precisa ser regulado à corrente nominal do motor

A linha de relés de sobrecarga térmica da WEG é composta de sete carcaças com diferentes faixas de ajuste de corrente por carcaça. As diferentes carcaças combinam-se com as respectivas carcaças da linha de contadores pela capacidade de corrente, como apresentado na Tabela 9.


	TYPE 3 poles		CW07		CWM9	CWM12	CWM18	CWM25	CWM32	CW M40
	Rated operational power	kW	1.5	2.2	3	4	6.5	9	11	
	230V	kW	3	4	5.5	7.5	11	15	18.5	
	400V	kW	-	4.5	5.5	9	12.5	15	22	
	415-440V	kW	-	5.5	7.5	10	15	18.5	25	
	500V	kW	-	5.5	7.5	10	15	18.5	30	
	690V	kW	-	-	-	-	-	-	-	-
	Rated operational current I _e AC-3 (440 V)	A	7	9	12	18	25	32	40	
	Conventional thermal current I _{th} = I _e AC-1	A	16	25	25	32	45	60	60	
	Rated operational current I _e AC-4	A	-	5	7	8	12	16	18.5	
Overload relays			RW17D		RW27D		RW67.1D			
			0.28...0.4	1.8...2.8	0.28...0.4	1.8...2.8	8...12.5	25...40	RW67.1D	
			0.4...0.63	2.8...4	0.4...0.63	2.8...4	10...15	32...50	RW67.1D	
			0.56...0.8	4...6.3	0.56...0.8	4...6.3	11...17			
			0.8...1.2	5.6...8	0.8...1.2	5.6...8	15...23			
			1.2...1.8	7...10	1.2...1.8	7...10	22...32			

Tabela 9* – Divisão das faixas de ajuste dos relés de sobrecarga térmico

Pelo motor WEG selecionado, motor de indução trifásico 4 pólos de 11kW 380V 60Hz, é possível dimensionar o relé de sobrecarga térmico adequado para proteção do respectivo motor contra sobrecarga.

Pela potencia nominal e pela corrente nominal do motor de indução trifásico é possível dimensionar o modelo do relé. A corrente nominal do motor de indução escolhido, ligado em delta, é 22,8 A.

Usando a Tabela 9 para encontrar a potencia nominal do motor – 11kW em 380V 60Hz, encontramos na linha 2, 400V, e procurando a potencia nominal ou valor maior mais próximo (11kW), encontra-se o contator CWM25 e o relé de sobrecarga RW27D.

Do mesmo modo, usando a corrente nominal (22,8 A) e procurando na coluna do relé de sobrecarga e encontra-se a faixa de ajuste que a corrente nominal está inclusa. A faixa de ajuste encontrada é de 15 a 23 A, e deste modo, o modelo do relé é RW27D-23 (15... 23 A).

A Tabela 10 mostra detalhadamente este critério de seleção onde o relé de sobrecarga térmico, RW27D-23, foi escolhido.

Introdução

* As potências nominais da na Tabela 9 consideram: motor de indução trifásico, 4 pólos, operando em categoria de utilização AC3, fator de serviço 1 e regime contínuo (S1).

TYPE		3 poles	CW07		CWM9	CWM12	CWM18	CWM25
Rated operational power								
230V		kW	1.5		2.2	3	4	6.5
400V		kW	3		4	5.5	7.5	11
415-440V		kW	-		4.5	5.5	8	12.5
500V		kW	-		5.5	7.5	10	15
690V		kW	-		5.5	7.5	10	15
Rated operational current I _e AC-3 (440 V)		A	7		9	12	18	25
Conventional thermal current I _{th} = I _e , AC-1		A	16		25	25	32	45
Rated operational current I _e , AC-4		A	-		5	7	8	12
Overload relays			RW17D		RW27D			
			0.28...0.4 1.8...2.8		0.28...0.4 1.8...2.8		0.28...0.4 1.8...2.8	
			0.4...0.63 2.8...4		0.4...0.63 2.8...4		0.4...0.63 2.8...4	
			0.56...0.8 4...6.3		0.56...0.8 4...6.3		0.56...0.8 4...6.3	
			0.8...1.2 5.6...8		0.8...1.2 5.6...8		0.8...1.2 5.6...8	
			1.2...1.8 7...10		1.2...1.8 7...10		1.2...1.8 7...10	

Tabela 10 – Critério de seleção do relé de sobrecarga

As características gerais da linha RWD são:

- Dispositivo térmico ajustável para proteção contra sobre corrente;
- Possui mecanismo diferencial de sensibilidade a falta de fase de acordo com IEC/EN 60947-4-4;
- Classe de disparo 10 e compensação de temperatura.



Figura 32 – Relé de sobrecarga térmico – linha RW27D

8.3 Materiais usados nos testes experimentais

Este capítulo descreve os materiais usados nos testes experimentais: testes de elevação de temperatura do motor de indução e testes de determinação das curvas características do relé de sobrecarga térmico.

Todos os testes foram realizados nos laboratórios da WEG Industrias e os principais materiais utilizados nos teste de elevação de temperatura do motor de indução foram:

- Motor de indução trifásico, 4 pólos de 11kW em 380V 60Hz;
- Bancada de teste de motores com dinamômetro para simular e controlar a carga mecânica (torque);
- Osciloscópio digital;
- Termopares tipo J;
- Microcomputador;
- Multímetro digital.

8.3.1 Motor de indução trifásico, 4 pólos de 11kW em 380V 60Hz

O motor foi preparado para os testes de elevação de temperatura com a instalação de quatro termopares nas principais partes do motor de indução para medição da elevação de temperatura.

A Figura 33 mostra as posições de instalação dos termopares no motor de indução.

Foi instalado um termopar por enrolamento do motor – thc 1, 2 e 3.

O quarto termopar (thc 4) foi instalado no núcleo do estator.

Um termopar adicional, thc 5, não foi instalado no motor, e ele fornecerá a temperatura ambiente.

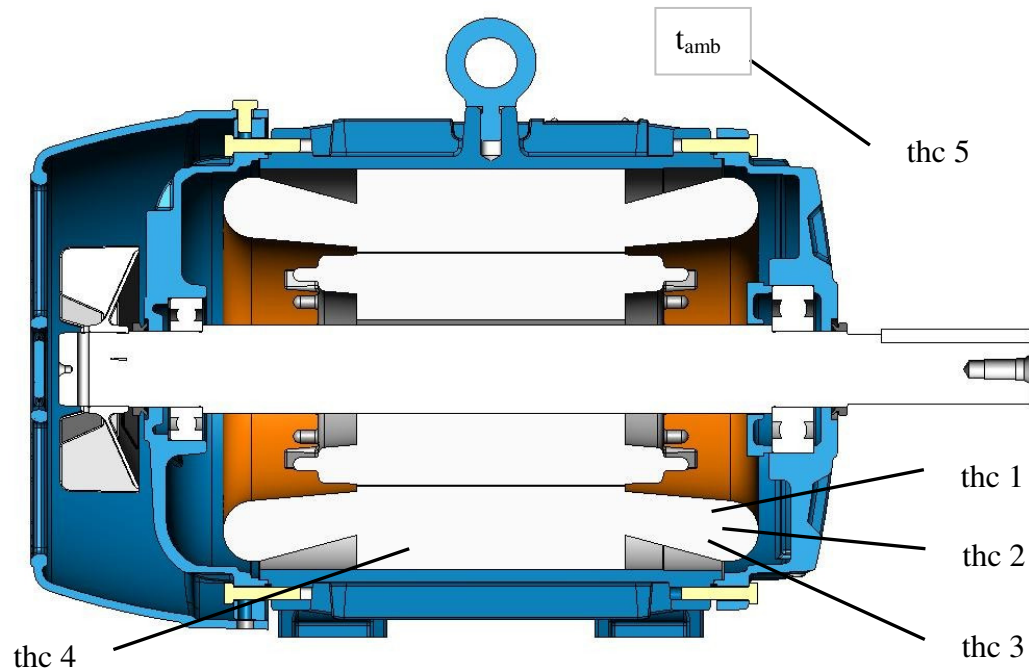


Figura 33 – Posição de instalação dos termopares

8.3.2 Bancada de teste de motores

Uma bancada específica para teste de motores que permite a montagem adequada do motor de indução e acoplamento da carga mecânica – dinamômetro, foi utilizada. Esta bancada de teste evita que o motor de indução em teste fique exposto a agentes externos como vibração, impacto, oscilações da rede de alimentação e outros que possam interferir nos resultados dos testes.

8.3.3 Osciloscópio digital

O osciloscópio digital usado foi um Yokogawa modelo LR8100. O LR8100 permite a aquisição de até 8 sinais simultâneos através de termopares (entradas) e possui sistema de comunicação RS232 ou impressão em papel através de sistema multi-penas (saídas).

8.3.4 Termopares

Cinco termopares do tipo J (Ferro/Constantan) foram colocados no motor de indução para transformar as temperaturas em sinais digitais e adquiridos pelo osciloscópio. Os termopares do tipo J são indicados para medições de temperaturas entre -40°C e 750°C com exatidão variando entre $\pm 0,8^{\circ}\text{C}$ e $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ dependendo da temperatura de medição e foram instalados em pontos estratégicos para medição das principais elevações de temperatura.



Figura 34 – Instalação dos termopares no motor de 11kW

8.3.5 Microcomputador

Um microcomputador foi utilizado para programar, ajustar, receber e analisar as informações do osciloscópio digital (aquisição de dados). A aquisição de dados foi realizada por um software de comunicação entre o microcomputador e o osciloscópio através do sistema RS232.

8.3.6 Multímetro digital

As tensões e correntes trifásicas dos testes foram medidas por um multímetro digital FLUKE serie 170 com exatidão de 1,0% para as medições de tensão e 1,5% para as medições de corrente. Além da boa exatidão dos valores monitorados, o multímetro também permite aquisição de dados e comunicação através de sistema RS232.

Imagens dos materiais utilizados nos testes são mostradas nas Figura 35 e Figura 36



Figura 35 – Microcomputador e materiais de medição



Figura 36 – Bancada de testes de motores e osciloscópio LR8100

Para determinar as curvas características do relé de sobrecarga térmico, os materiais utilizados foram:

- Relé de sobrecarga térmico RW27D-23;
- Fonte de corrente;
- Máquina de teste de calibração;
- Microcomputador.

8.3.7 Relé de sobrecarga térmico

Relés de sobrecarga RW27D-23 padrão com faixa de ajuste de 15 A a 23 A foram utilizados nos testes.

8.3.8 Fonte de corrente

Uma fonte de corrente de 600W e controle digital, para evitar variações de corrente, foi usada para gerar as correntes dos testes. A fonte de corrente é ajustável por dial e taps de um transformador e tem capacidade máxima de fornecimento de 700 A, com tempo de resposta menor que 100 ms e exatidão de 1%.

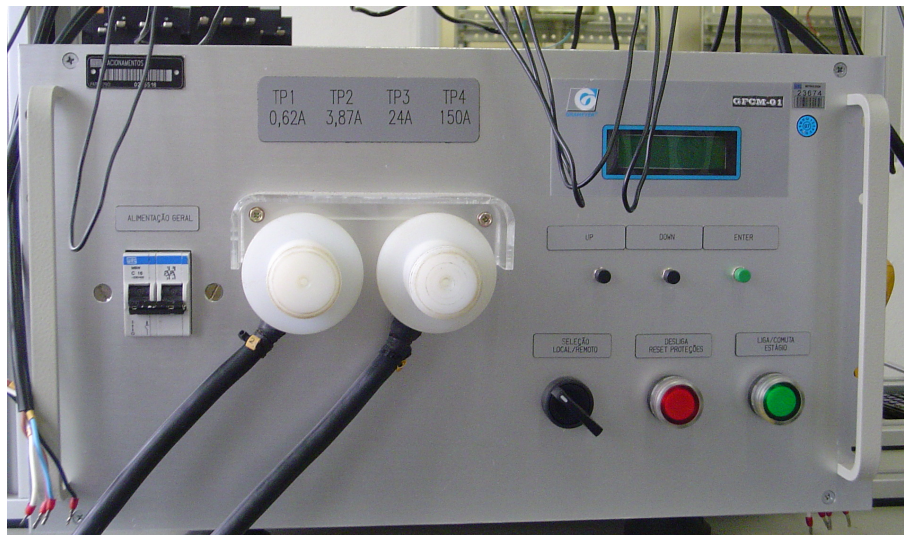


Figura 37 – Fonte de corrente

8.3.9 Máquina de teste de calibração

A máquina de teste de calibração permite o teste simultâneo de até 10 relés de sobrecarga. A corrente do teste é fornecida pela fonte de corrente e os relés de sobrecarga térmico são conectados em série. Assim, consegue-se garantir que a corrente que passa pelos relés de sobrecarga e seus bimetais é a mesma.

O sistema de monitoramento e aquisição para o tempo de disparo é realizado através do contato auxiliar normalmente aberto (NA – 97/98) do relé de sobrecarga. O contato auxiliar comuta assim que o disparo do relé acontece. A máquina de teste de calibração identifica qual amostra disparou e grava o tempo de disparo em um banco de dados.

A imagem da máquina de teste de calibração e o microcomputador é mostrado na Figura 38.

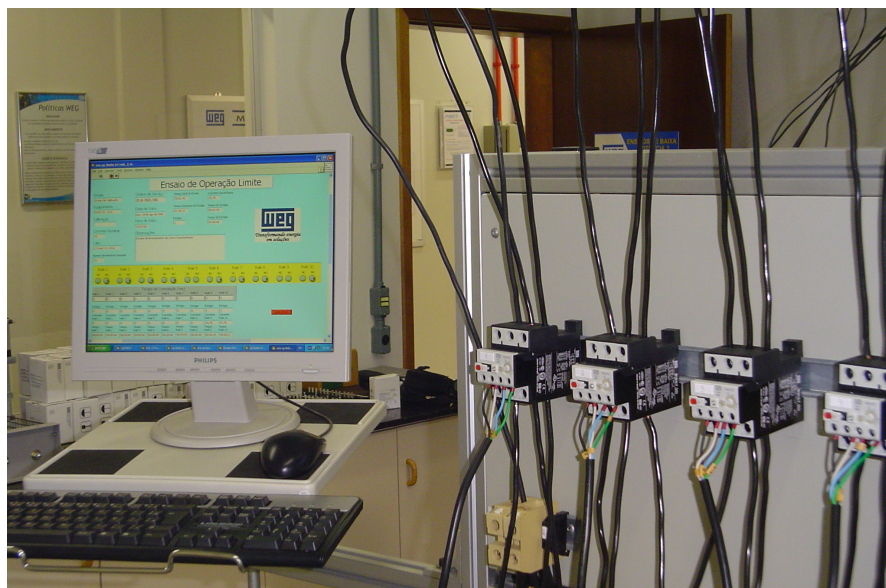


Figura 38 – Máquina de teste de calibração e microcomputador

8.3.10 Microcomputador

Para fazer a aquisição e análise dos dados da máquina de teste de calibração foi utilizado um microcomputador. A interface entre a máquina de calibração e o microcomputador foi feita em LabView e sistema RS232.

Os dados dos testes foram adquiridos e armazenados para análise e determinação das curvas características dos relés de sobrecarga térmico com o auxílio do software *EXCEL*.



Figura 39 – Software de aquisição de dados dos tempos de disparo

9 Testes experimentais e resultados

O capítulo 9 descreve os procedimentos experimentais utilizados para determinação das curvas características do relé de sobrecarga térmico e dos testes de elevação de temperatura do motor de indução trifásico. Aplicando essa metodologia, o objetivo é:

- Determinar as curvas características do relé de sobrecarga térmico;
- Medição das temperaturas máximas reais do motor de indução trifásico operando em condição normal;
- Identificar o ponto mais quente do motor de indução operando em condições normal e anormais;
- Medição da elevação de temperatura do motor de indução trifásico operando com rotor bloqueado e seu respectivo tempo limite;
- Medição da elevação de temperatura do motor de indução trifásico operando com falta de fase e seu respectivo tempo limite;

Com todos esses dados, será possível comparar o tempo de disparo do dispositivo de proteção como os tempos limites do motor operando em condições anormais, bem como avaliar a efetiva proteção do relé de sobrecarga térmico contra rotor bloqueado e falta de fase.

9.1 Determinação das curvas características do relé de sobrecarga térmico

Para determinar as curvas características do relé de sobrecarga térmico é necessário encontrar o tempo de disparo para cada múltiplo de corrente do relé de sobrecarga – curva t_p vs I/I_n .

De acordo com a norma IEC/EN 60947-4-1, o relé de sobrecarga térmico tripolar classe 10 deve funcionar de acordo com os limites de operação tripolar, conforme mostrado na Tabela 11, quando todos os pólos estão energizados.

Múltiplos da corrente de ajuste	Tempos limite de operação
1,05	Não dispara
1,2	Dispara em até 2 horas
1,5	Dispara em até 4 minutos
7,2	Dispara entre 4 e 10 segundos

Tabela 11 – Limites de operação do relé de sobrecarga classe 10 quando todos os pólos são energizados

O teste usando 1,05 vezes a corrente de ajuste é apenas um teste de verificação de não disparo do relé. Por causa disso, este múltiplo de corrente não será considerado para o teste de determinação do tempo de disparo, mas ele será utilizado como ponto tangente na determinação da curva característica.

Os múltiplos de corrente de ajuste de 2, 3 e 10 vezes foram adicionados no teste. Deste modo, o grande espaço entre os pontos 1,5 e 7,2 é reduzido e consequentemente, uma melhora na precisão dos resultados serão alcançados. Assim, os testes foram realizados com os seguintes múltiplos de corrente de ajuste: 1,05, 1,2, 1,5, 2,0, 3,0, 7,2 e 10.

Os testes para cada múltiplo de corrente foram executados em três diferentes pontos da faixa de ajuste do relé de sobrecarga térmico. Com isso, toda a faixa do relé é coberta. Os pontos escolhidos foram mínimo, intermediário e máximo da faixa de ajuste.

Como o relé de sobrecarga térmico selecionado para os testes foi o RW27D-23 com faixa de ajuste de 15A a 23A e considerando o exposto, as correntes de testes são apresentadas na Tabela 12.

Múltiplo de corrente	Corrente mínima da faixa de ajuste (15 A)	Corrente intermediária da faixa de ajuste (19 A)	Corrente máxima da faixa de ajuste (23 A)
1,2	18,00	22,80	27,60
1,5	22,50	28,50	34,50
2,0	30,00	38,00	46,00
3,0	45,00	57,00	69,00
7,2	108,00	136,80	165,60
10,0	150,0	190,0	230,0

Tabela 12 – Correntes de teste tripolar

Deste modo, utilizando a máquina de teste de calibração foi encontrado simultaneamente os tempos de disparo de dez diferentes amostras de relés de sobrecarga para cada corrente a partir do estado frio.

Com os valores de tempo de disparo obtidos nos testes, as curvas com os valores máximos e mínimos foram traçadas para cada múltiplo de corrente. Estas curvas representam as máximas dispersões da curva característica do relé de sobrecarga térmico.

Adicionalmente, uma curva característica com a média aritmética dos tempos de disparo encontrados por múltiplo de corrente foi determinada. Deste modo, as curvas características tripolar do relés de sobrecarga térmico RW27D-23 operando com os três pólos energizados pela mesma corrente e partindo do estado frio é mostrado na Figura 40.

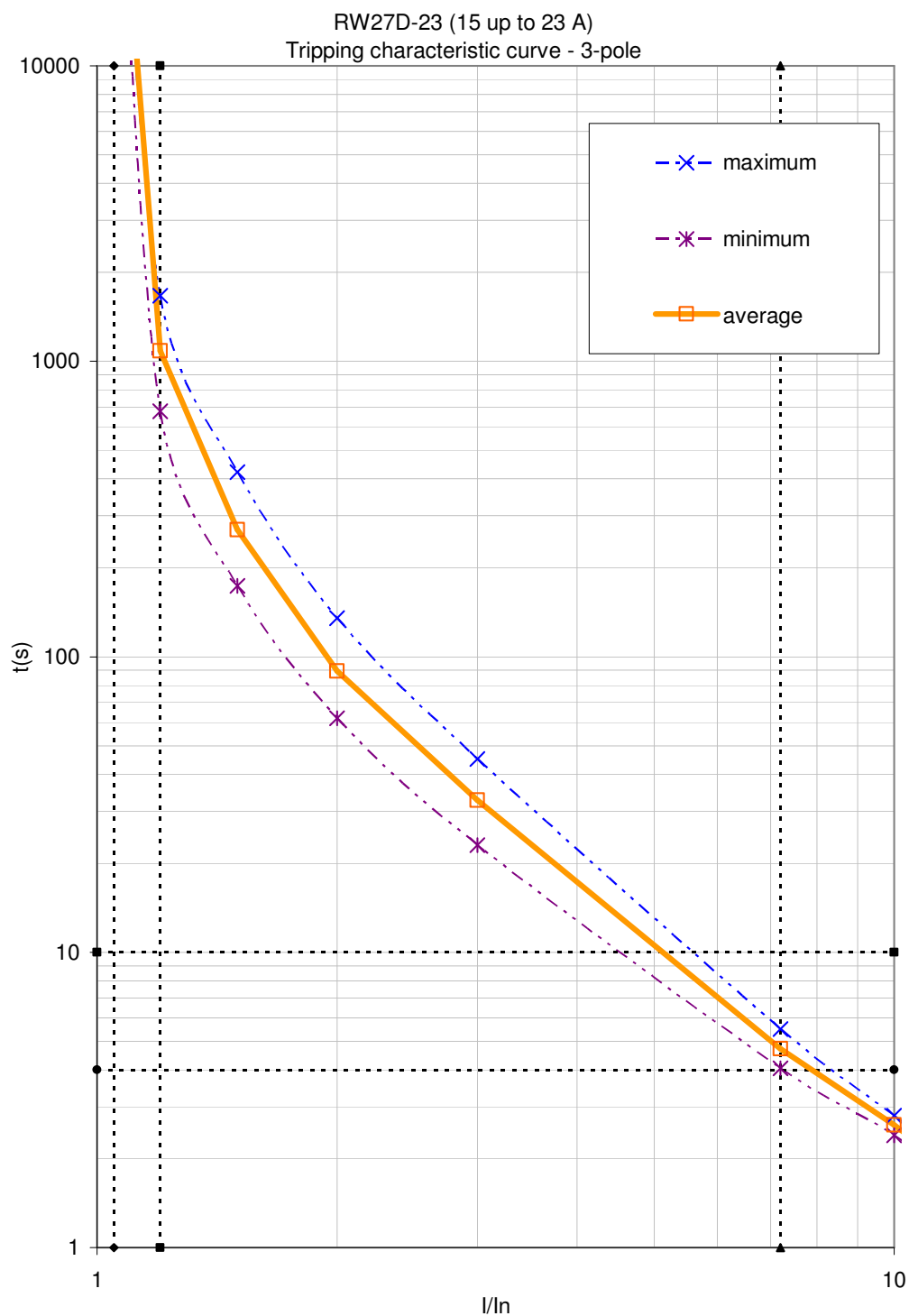


Figura 40 – Curvas características tripolar do RW27D-23 – tempo vs corrente

Basicamente, o mesmo procedimento dos testes tripolar foi implementado para determinação das curvas características do relé de sobrecarga térmico operando na condição bipolar.

A condição bipolar simula a condição do relé de sobrecarga térmico operando sob falta de fase, onde duas fases e consequentemente, dois bimetáis do relé estão energizados.

De acordo com a norma IEC/EN 60947-4-1, o relé de sobrecarga térmico tripolar classe 10 deve funcionar de acordo com os limites de operação bipolar quando apenas dois pólos estão energizados, conforme mostrado na Tabela 13.

Múltiplo de corrente	Tempos limite de operação
2 pólos = 1,05 1 pólo = 0,9	Não dispara
2 pólos = 1,15 1 pólo = 0	Dispara em até 2 horas

Tabela 13 – Limites de operação do relé de sobrecarga classe 10 quando apenas dois pólos são energizados

Como feito para o múltiplo de corrente 1,05 vezes no teste tripolar, o múltiplo de corrente, onde dois pólos são ajustados em 1,05 e um pólo ajustado em 0,9 vezes não foi considerado para o teste de determinação do tempo de disparo, mas ele será utilizado como um ponto tangente para traçar a curva característica de disparo.

De modo a melhorar a precisão da curva característica, alguns múltiplos de corrente foram adicionados complementarmente. Os múltiplos foram: 1,05, 1,2, 1,5, 2,0, 3,0, 7,2 e 10. Os testes para cada múltiplo de corrente foram realizados em três diferentes pontos da faixa de ajuste do relé de sobrecarga: mínima, intermediária e máxima da faixa de ajuste.

Como o relé de sobrecarga térmico selecionado para os testes foi o RW27D-23 com faixa de ajuste de 15A a 23A e considerando o exposto, as correntes de teste são apresentadas na Tabela 14.

Múltiplo de corrente	Corrente mínima da faixa de ajuste (15 A)			Corrente intermediária da faixa de ajuste (19 A)			Corrente máxima da faixa de ajuste (23 A)		
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 1	Fase 2	Fase 3
1,05	15,75	0	15,75	19,95	0	19,95	24,15	0	24,15
1,15	17,25	0	17,25	21,85	0	21,85	26,45	0	26,45
1,2	18,00	0	18,00	22,80	0	22,80	27,60	0	27,60
1,5	22,50	0	22,50	28,50	0	28,50	34,50	0	34,50
2,0	30,00	0	30,00	38,00	0	38,00	46,00	0	46,00
3,0	45,00	0	45,00	57,00	0	57,00	69,00	0	69,00
7,2	108,0	0	108,0	136,8	0	136,8	165,6	0	165,6
10,0	150,0	0	150,0	190,0	0	190,0	230,0	0	230,0

Tabela 14 – Correntes de teste bipolar

Um teste simultâneo em dez diferentes amostras de relés de sobrecarga utilizando a máquina de calibração para cada corrente de teste foi realizado a partir do estado frio.

Com os valores de tempo de disparo obtidos nos testes bipolares, as curvas com os valores máximos e mínimos foram traçadas para cada múltiplo de corrente. A curva característica com a média aritmética dos tempos de disparo encontrados por múltiplo de corrente também foi determinada. Deste modo as curvas características bipolar do relé de sobrecarga térmico RW27D-23 operando com os dois pólos energizados pela mesma corrente e partindo do estado frio é mostrado na Figura 41.

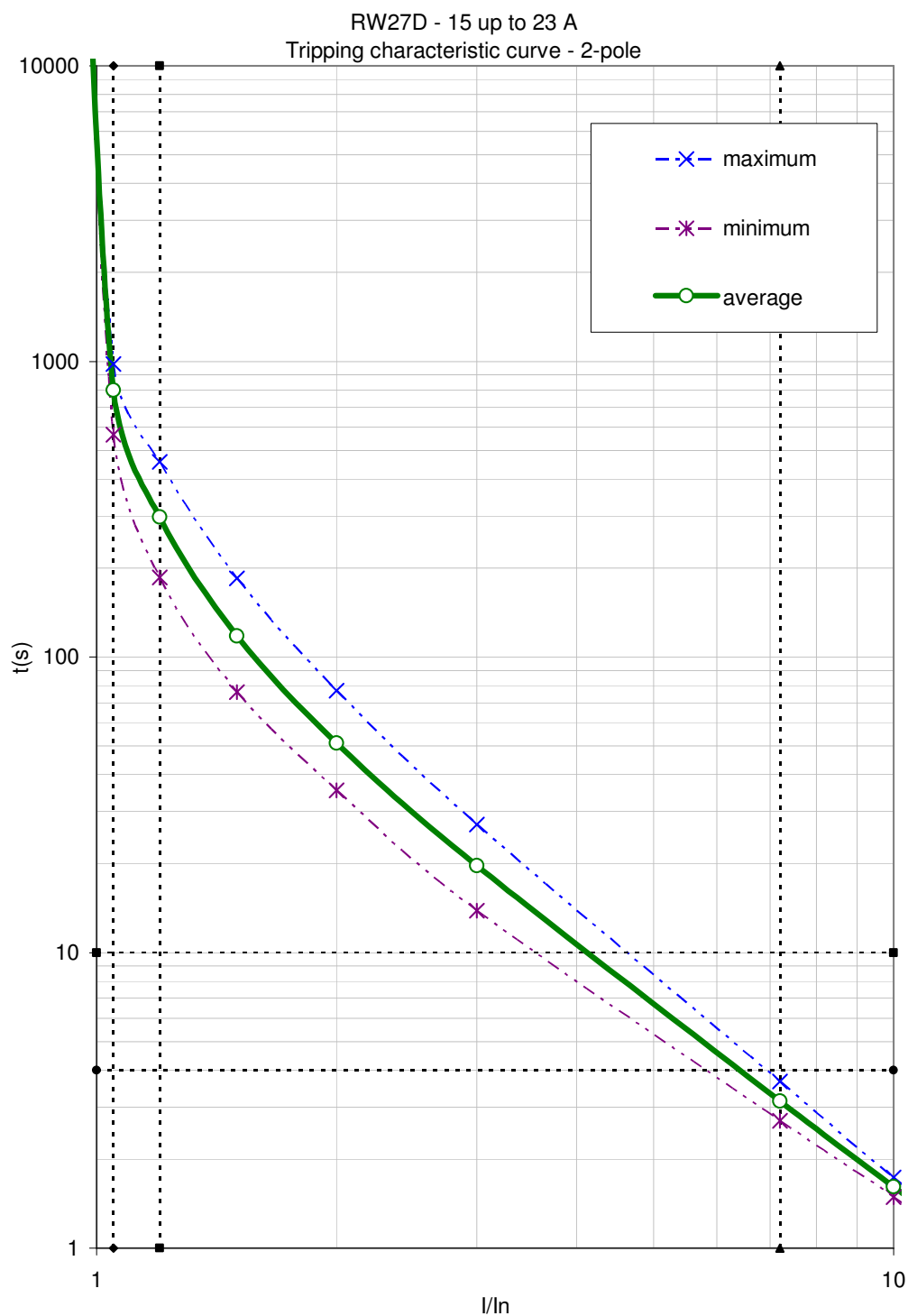


Figura 41 – Curvas características bipolar do RW27D-23 – tempo vs corrente

Considerando apenas as curvas características médias tripolar e bipolar como as curvas características, Figura 42, elas representam as curvas característica de disparo do RW27D-23 operando em condições bipolar e tripolar. Estas duas curvas características serão utilizadas mais adiante para comparação e avaliação.

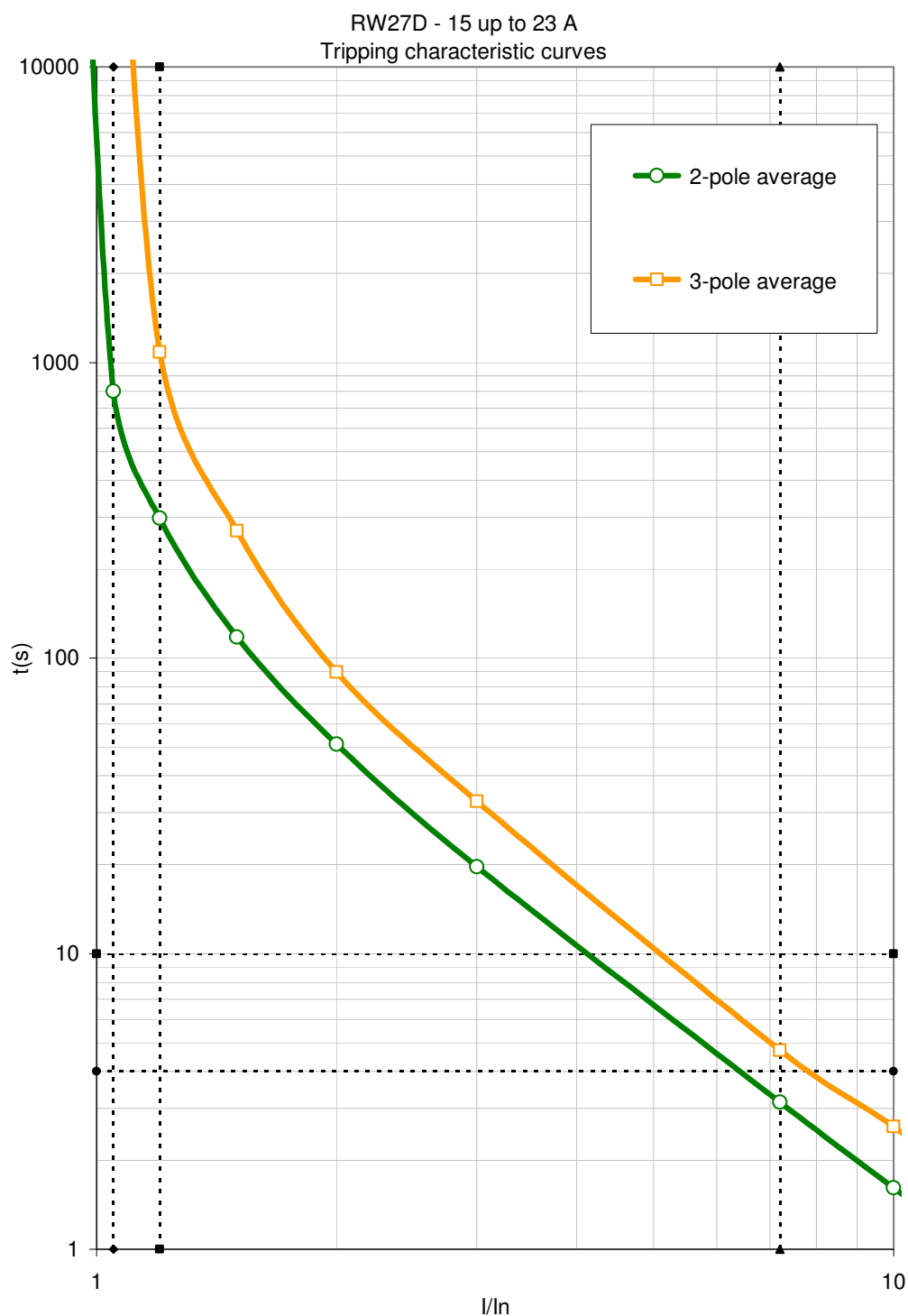


Figura 42 – Curvas características media de disparo do RW27D-23 – tempo vs corrente

9.2 Testes de elevação de temperatura do motor de indução trifásico

Os testes de elevação de temperatura foram realizados usando um motor de indução trifásico padrão, 4 pólos de 11kW em 380V 60Hz.

9.2.1 Teste de elevação de temperatura do motor operando sob condição normal

O motor foi fixado na bancada de teste e o dinamômetro montado no motor, tomando o cuidado de alinhar os eixos do motor e do dinamômetro. O motor foi ligado em delta e sua resistência ôhmica medida usando ponte Kelvin – resistência elétrica a frio.

Ligou-se o motor de indução e os parâmetros nominais foram ajustados: tensão e carga mecânica conforme especificado na plaqueta de identificação. Para este teste:

- Tensão = 380V 60Hz
- Carga mecânica = 59,9 N.m

Durante o teste, os parâmetros monitorados foram adquirido pelo osciloscópio digital com taxa de aquisição de uma aquisição por minuto.

O motor funcionou em condições nominais até atingir a temperatura de estabilização. Depois o motor foi desligado. Desconectada a tensão de alimentação, foi feita a medição da resistência ôhmica a quente com a ponte Kelvin.

Os valores medidos são apresentados nas Figura 43 e Figura 44 e os resultados dos testes apresentados na Tabela 15.

Parâmetros elétricos			
Pontos de medição		Temperatura máxima (°C)	ΔT (°C)
thc 1	Enrolamento 1	115,5	88,1
thc 2	Enrolamento 2	117,2	89,8
thc 3	Enrolamento 3	117,1	89,7
thc 4	Núcleo do estator	92,8	65,4
thc 5	Temperatura ambiente	27,4	

Tabela 15 – Medições da elevação de temperatura do motor de indução 11kW 380V 60Hz sob condição normal

Outros valores medidos durante o teste:

Resistência ôhmica a frio = 0,6278 Ω

Corrente do teste = 22,3 A

Carga mecânica = 60,07 N.m

Resistência ôhmica a quente = 0,8169 Ω

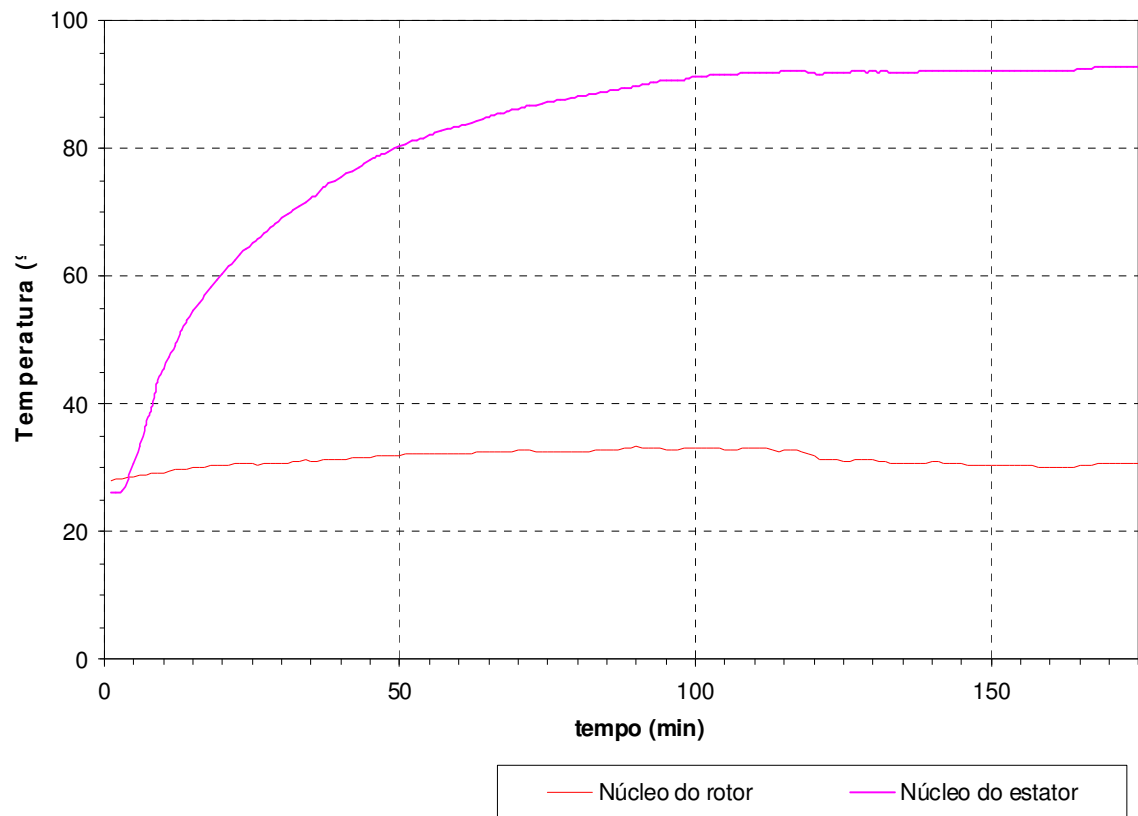


Figura 43 – Medições de temperaturas máximas do motor de indução 11kW 380V 60Hz sob condição normal

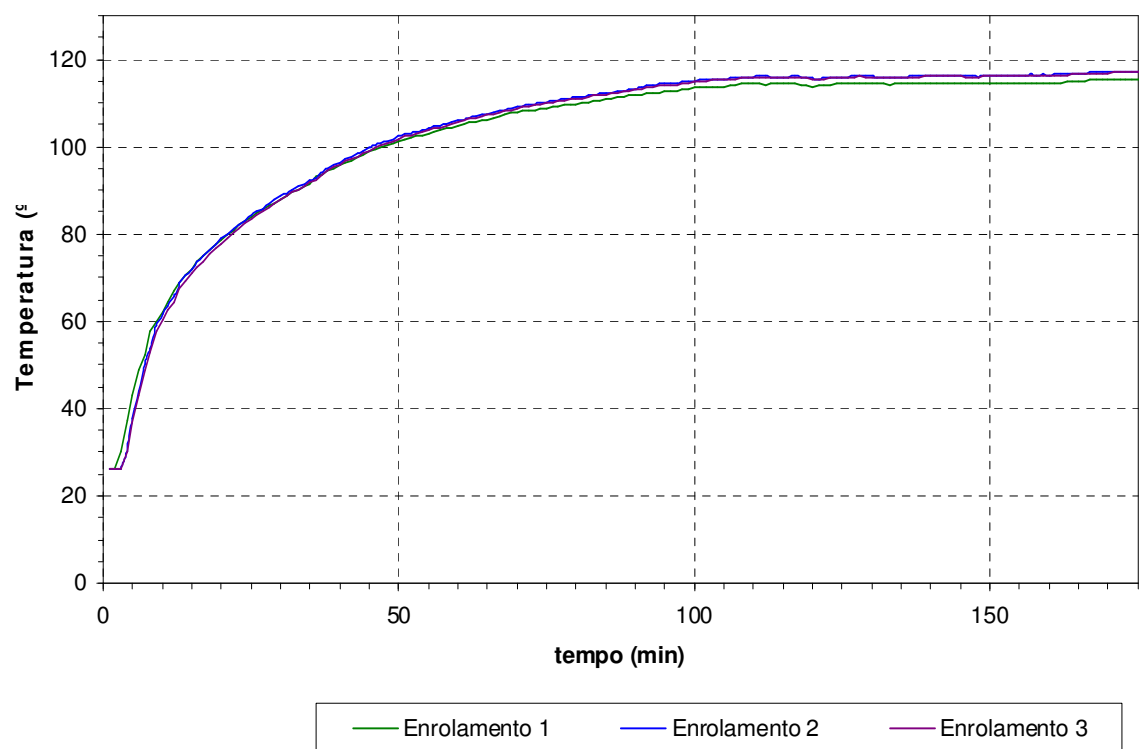


Figura 44 - Medições de temperaturas máximas do motor de indução 11kW 380V 60Hz sob condição normal

Como as temperaturas máximas foram medidas diretamente usando termopares instalados no motor e outro termopar para medição da temperatura ambiente, a elevação de temperatura para cada ponto é facilmente calculada. A elevação de temperatura foi à temperatura máxima final menos a temperatura ambiente.

Também foi possível estimar a elevação de temperatura usando o método de medição de elevação de temperatura pela variação das resistências, como calculado pela equação (2).

$$\Delta t = t_f - t_a = \left(\frac{R_t}{R_a} - 1 \right) (t_a + C) \quad (2)$$

Sabendo que $C = 234,5$ para o cobre, a equação (2) será:

$$\Delta t = t_f - t_a = \left(\frac{R_t}{R_a} - 1 \right) (t_a + 234.5)$$

Com isso,

$$\Delta t = \left(\frac{0.8169}{0.6278} - 1 \right) (27.4 + 234.5)$$

Portanto,

$\Delta t = 78.89 K$

O ponto mais quente do motor é a soma da temperatura ambiente mais a elevação de temperatura (Δt) mais a diferença que existe entre a temperatura média dos enrolamentos, usando a medição pela variação da resistência. De acordo com a normas IEC e NEMA, esta diferença é 10°C .

Portanto, o ponto mais quente usando o método de medição da elevação de temperatura pela variação da resistência é $78,9 + 10,0 + 27,4 = 116,3^\circ\text{C}$.

Comparando a temperatura mais quente usando o método de medição da elevação de temperatura pela variação da resistência ($116,3^\circ\text{C}$) com a temperatura medida usando termopar (enrolamento 2 = $117,2^\circ\text{C}$). A diferença encontrada é menor do que $0,8\%$ e esse valor é aceitável, considerando que o valor de $116,3^\circ\text{C}$ é um valor estimado.

Além disso, e também importante é que ambos os pontos mais quentes mantiveram abaixo da temperatura-limite determinada pela classe de isolamento B (130°C) e evitando danos no motor causados por sobre-aquecimento durante o funcionamento do motor em condição normal.

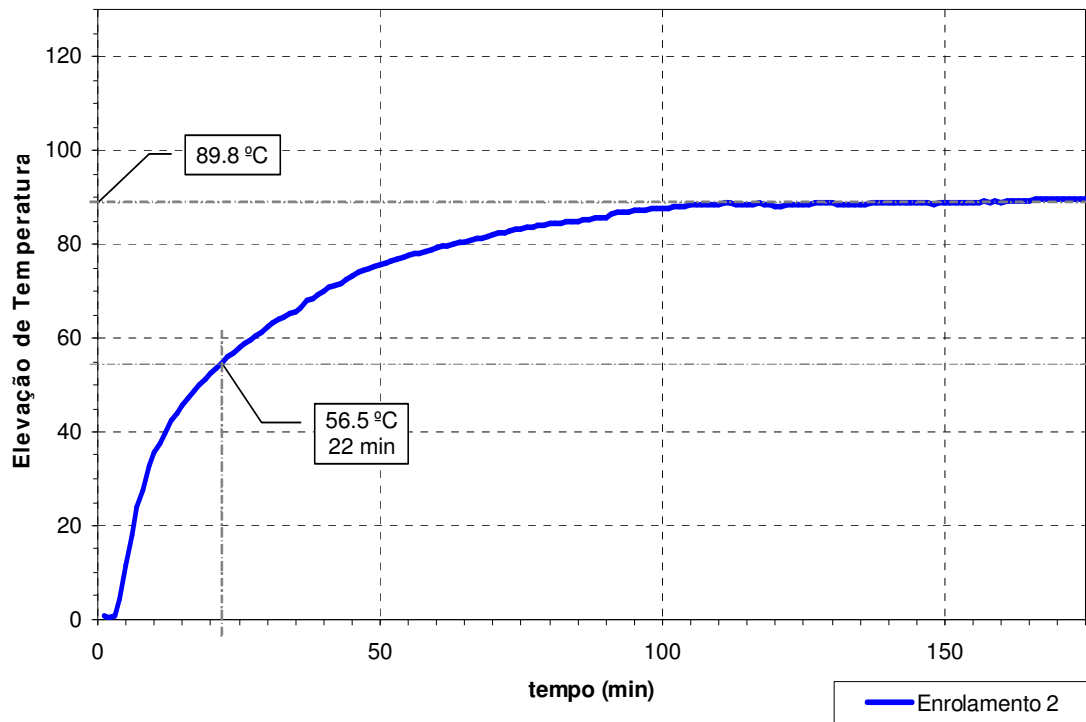


Figura 45 – Elevação de temperatura máxima do motor de indução 11kW 380V 60Hz sob condição normal

Mostrando individualmente a elevação de temperatura do ponto mais quente (enrolamento 2), é possível estimar a constante de tempo de aquecimento τ para o motor de 11kW. τ é o tempo necessário para o motor alcançar aproximadamente 63% de sua elevação de temperatura máxima para motores previamente em equilíbrio com o ambiente, $\Delta T_0 = 0$.

A Figura 45 ilustra a curva de elevação de temperatura máxima do motor. O valor máximo da elevação de temperatura foi 89,9°C e onde 63% desse valor é 56,5°C. Com isso, é possível encontrar a constante de tempo de aquecimento $\tau = 22$ minutos.

De acordo com os anexos, a constante de tempo de aquecimento de um motor WEG na carcaça 132M é 20,64 minutos. A diferença entre o valor de τ encontrado no teste (22 minutos) e o valor padrão τ para um motor na carcaça 132M (20,64 minutos) é de aproximadamente 6,5%.

9.2.2 Teste de elevação de temperatura do motor operando sob condição de rotor bloqueado

O motor foi fixado na bancada de testes, conectado em delta e seu rotor bloqueado. Os três pólos do relé de sobrecarga RW27D-23 foram ligados em série com as três fases o motor em teste.

Adicionalmente aos cinco termopares, o sinal do contato auxiliar normalmente fechado do RW27D-23 foi monitorado através de um transdutor para o osciloscópio. Este sinal indica o estado de disparo do relé de sobrecarga térmico.

Ligou-se o motor de indução e ajustou-se o parâmetro nominal conforme especificado na plaqueta de identificação.

- Tensão = 380V 60Hz

Durante o teste, os cinco sinais de temperatura dos termopares e o sinal do contato auxiliar do relé foram monitorados e adquiridos pelo osciloscópio digital com taxa de aquisição de uma aquisição por segundo.

O motor funcionou na condição de rotor bloqueado até atingir a máxima temperatura em um dos enrolamentos, 130°C. Quando 130°C foi encontrado, o motor de indução foi desligado de forma manual. A Figura 46 mostra o comportamento dos parâmetros monitorados durante o teste.

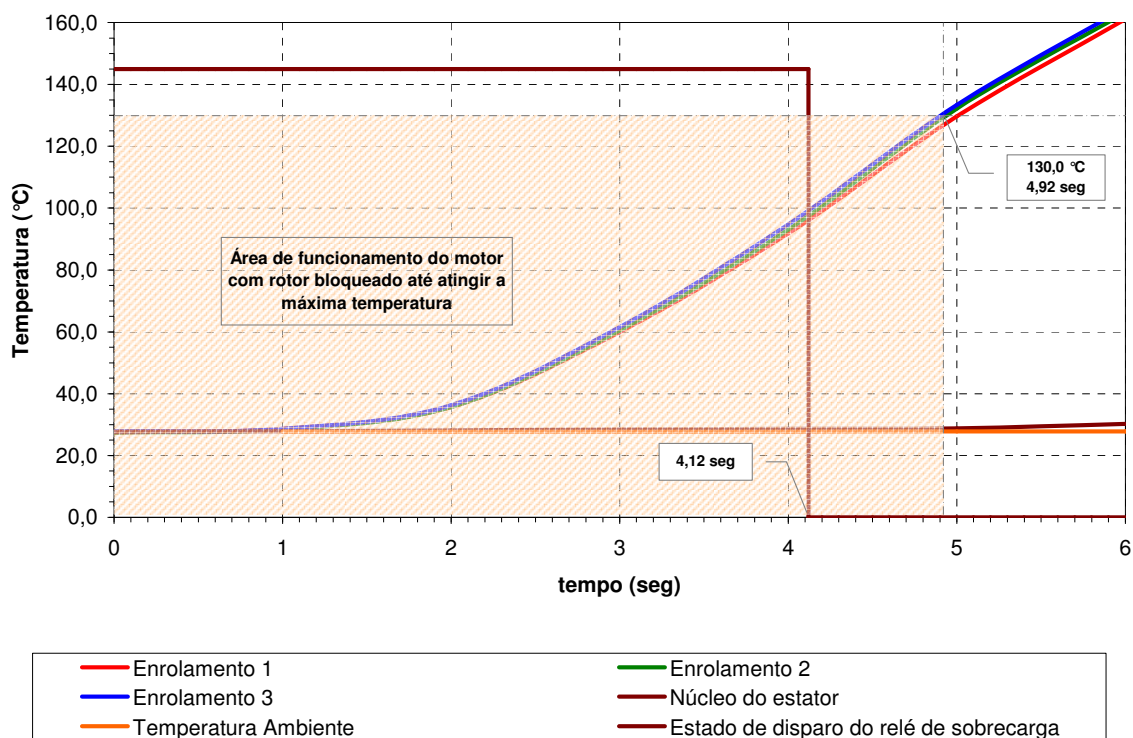


Figura 46 – Medição das temperaturas máximas do motor de indução de 11kW operando com rotor bloqueado

Durante o teste, a corrente de rotor bloqueado foi medida e o valor é apresentado abaixo:

$$I_{\text{rotor bloqueado}} = 186,3 \text{ A } (8,17 \times I_{\text{nominal}})$$

$$I_{\text{nominal}} = 22,8 \text{ A}$$

Através da Figura 46, é possível determinar os resultados do teste. Os resultados são apresentados na Tabela 16

Parâmetros	Resultado
Tempo máximo permitido	4,92 segundos
Tempo de disparo do relé de sobrecarga térmico	4,12 segundos

Tabela 16 – Resultados obtidos do teste de rotor bloqueado

O tempo de disparo do relé de sobrecarga de acordo com a curva característica tripolar média (Figura 42) é 3,8 segundos.

Comparando o tempo máximo permitido do motor com rotor bloqueado e os tempos de disparo do relé de sobrecarga, conclui-se que o relé de sobrecarga RW27D-23 propicia uma proteção efetiva do motor contra sobre-aquecimento, quando o motor está operando sob a condição de rotor bloqueado. O tempo de disparo do relé de sobrecarga é menor do que o tempo máximo permitido do motor.

9.2.3 Teste de elevação de temperatura do motor operando sob condição de falta de fase e 100% de carga

O motor foi fixado na bancada de teste e ligado em delta. O relé de sobrecarga RW27D-23 foi conectado em série com as três fases do motor.

Os cinco sinais de temperatura dos termopares e o sinal do contato auxiliar do RW27D-23 foram monitorados através do osciloscópio. O motor foi ligado e ajustou-se os parâmetros nominais do motor: tensão e carga mecânica conforme plaqueta de identificação. Para este teste os valores são:

- Tensão = 380V 60Hz
- Carga mecânica $C_{\text{nominal}} = 59,9 \text{ N.m}$

O motor funcionou em condições normais até atingir a temperatura de estabilização. Depois disso, a fase “S” foi desconectada, simulando uma condição de falta de fase. O motor operou sob condição de falta de fase até a temperatura de um dos enrolamentos atingir a temperatura máxima permitida, 130°C. Quando a temperatura máxima foi encontrada, o motor de indução foi desligado manualmente.

Durante o teste, os parâmetros monitorados foram adquiridos pelo osciloscópio digital com taxa de aquisição de uma aquisição por minuto.

A Figura 47 apresenta o comportamento dos parâmetros monitorados no teste.

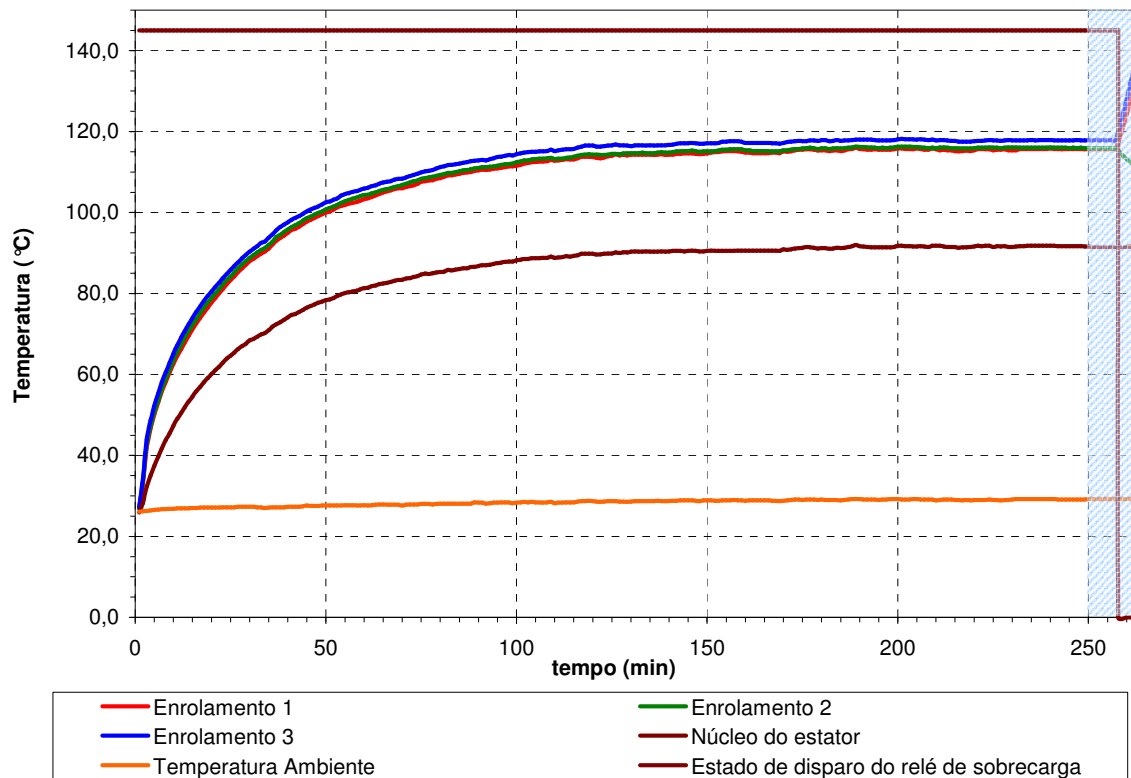


Figura 47 – Medição das temperaturas máximas do motor de indução de 11kW operando em falta de fase

Outros dados foram medidos durante o teste e são apresentados abaixo:

$$I_{\text{nominal}} = 22,8 \text{ A}$$

$$I_{\text{falta de fase}} = 44,8 \text{ A } (1,96 \times I_{\text{nominal}})$$

$$C_{\text{falta de fase}} = 59,9 \text{ N.m } (1 \times C_{\text{nominal}}) - \text{ carga mecânica}$$

Para uma melhor visualização do comportamento das temperaturas e do tempo de disparo do relé de sobrecarga na condição de falta de fase, a região sob falta de fase (área azul) da Figura 47 é destacada e apresentada separadamente na Figura 48.

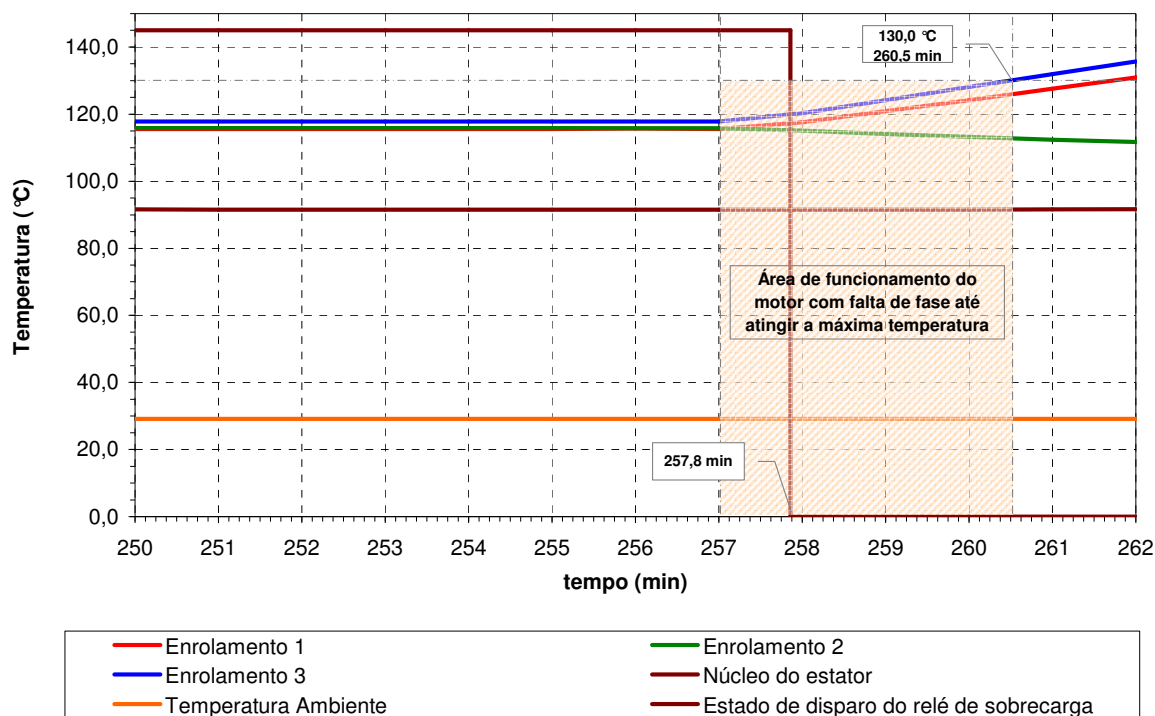


Figura 48 – Região de transição do motor de indução de 11kW operando com falta de fase

Pela Figura 48, é possível obter os resultados do teste e os valores são apresentados na Tabela 17.

Parâmetros	Resultado
Tempo máximo permitido com falta de fase	3 min 30 seg
Tempo de disparo do relé de sobrecarga térmico	1 min 48 seg

Tabela 17 – Resultados obtidos do teste de falta de fase com 100% carga

O tempo de disparo do relé de sobrecarga de acordo com a curva característica bipolar média (Figura 42) é 55 segundos.

Comparando o tempo máximo permitido do motor e os tempos de disparo do relé de sobrecarga, conclui-se que o relé de sobrecarga RW27D-23 propicia uma proteção efetiva do motor contra sobre-aquecimento, quando o motor está operando sob a condição de falta de fase com 100% de carga. O tempo de disparo do relé de sobrecarga é menor do que o tempo máximo permitido do motor.

9.2.4 Teste de elevação de temperatura do motor operando sob condição de falta de fase e 60% de carga

O teste de elevação de temperatura do motor operando sob condição de falta de fase com 60% de carga foi realizado com a mesma montagem e procedimento dos últimos testes: motor ligado em delta e o relé RW27D-23 conectado em série com as três fases do motor.

Os cinco sinais de temperatura dos termopares e o sinal do contato auxiliar do RW27D-23 foram monitorados através do osciloscópio. Ligou e ajustaram-se os parâmetros nominais do motor: tensão e carga mecânica conforme plaqueta de identificação. Para este teste os valores são:

- Tensão = 380V 60Hz
- Carga mecânica $C_{\text{nominal}} = 59,9 \text{ N.m}$

O motor funcionou em condições normais até atingir a temperatura de estabilização. Depois disso, a fase “S” foi desconectada, simulando uma condição de falta de fase a carga mecânica reduzida para 60% da nominal. O motor operou sob condição de falta de fase até a temperatura de um dos enrolamentos atingir a temperatura máxima permitida, 130°C. Quando a temperatura máxima foi encontrada, o motor de indução foi desligado manualmente.

Durante o teste, os parâmetros monitorados foram adquiridos pelo osciloscópio digital com taxa de aquisição de uma aquisição por minuto e a Figura 49 mostra o comportamento dos parâmetros monitorados no teste.

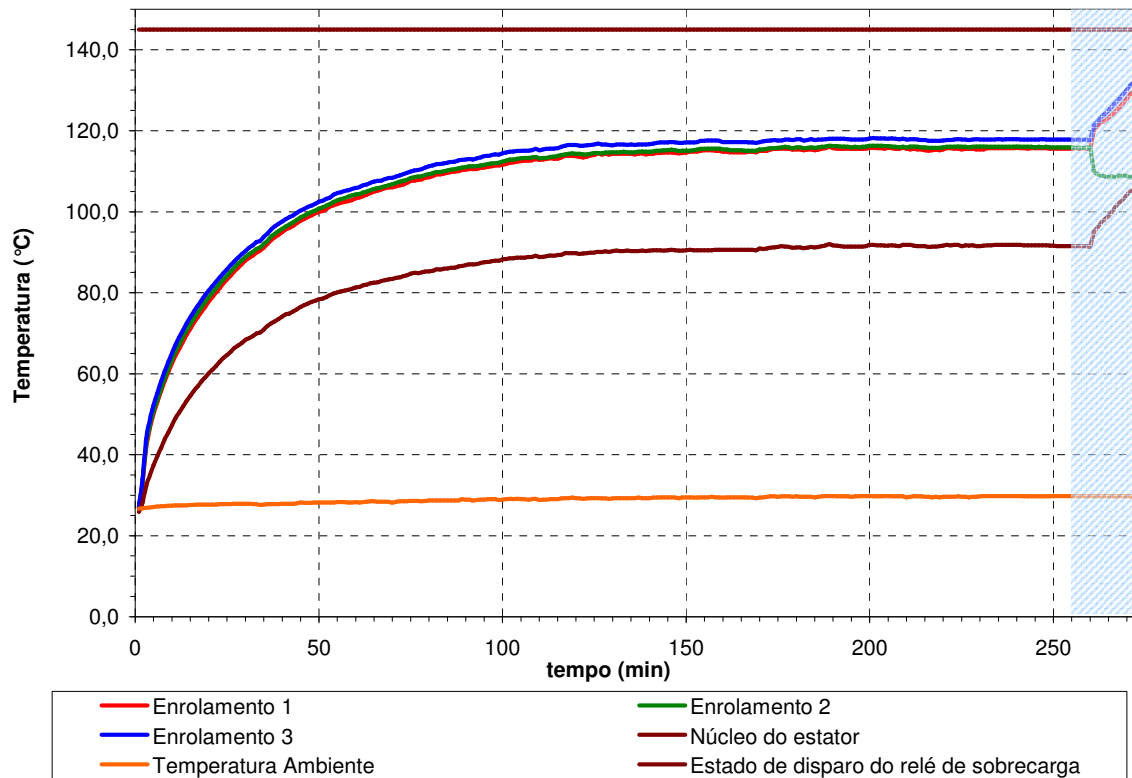


Figura 49 – Medição das temperaturas máximas do motor de indução de 11kW operando em falta de fase e 60% de carga mecânica

Outros dados foram medidos durante o teste e são apresentados abaixo:

$$I_{\text{nominal}} = 22,8 \text{ A}$$

$$I_{\text{falta de fase}} = 23,95 \text{ A } (1,05 \times I_{\text{nominal}})$$

$$C_{\text{falta de fase}} = 35,95 \text{ N.m } (0,6 \times C_{\text{nominal}}) - \text{ carga mecânica}$$

A Figura 50 mostra em detalhe o comportamento das temperaturas e do tempo de disparo do relé de sobrecarga na condição de falta de fase (área azul da Figura 49).

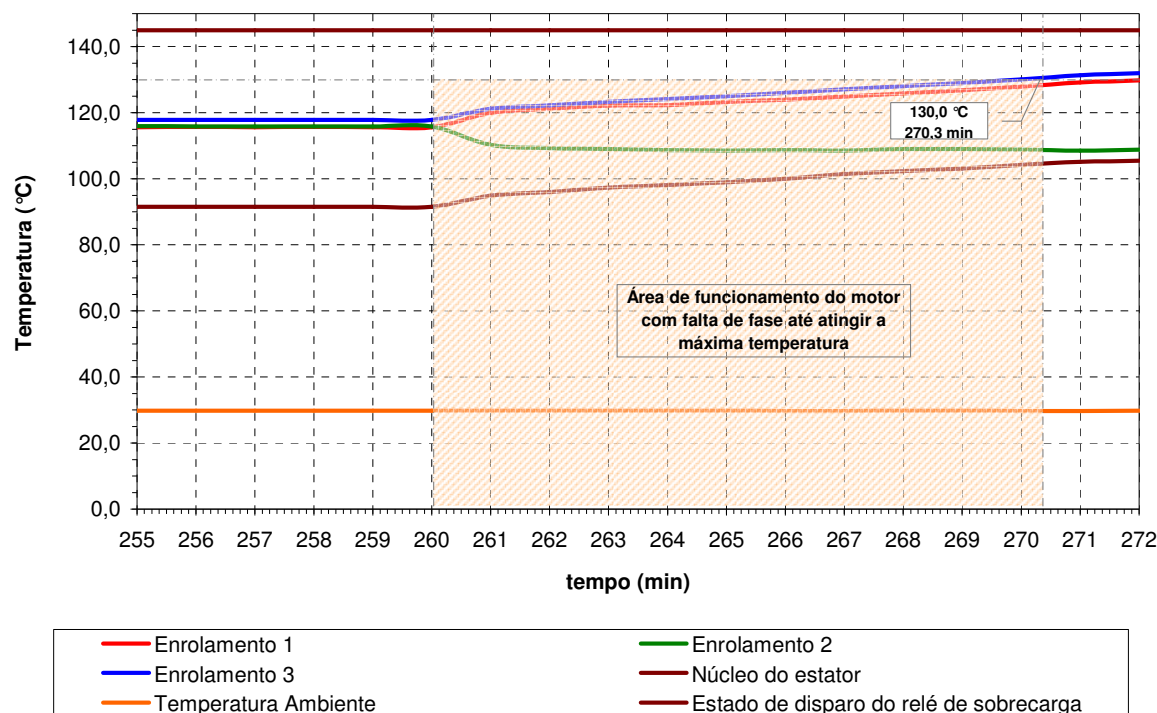


Figura 50 – Região de transição do motor de indução de 11kW operando com falta de fase e 60% de carga mecânica

Através da Figura 50, é possível obter os resultados do teste e os valores são apresentados na Tabela 18

Parâmetros	Resultado
Tempo máximo permitido com falta de fase	10 min 18 seg
Tempo de disparo do relé de sobrecarga térmico	Não disparou

Tabela 18 – Resultados obtidos do teste de falta de fase com 60% carga

O tempo de disparo do relé de sobrecarga de acordo com a curva característica bipolar média (Figura 42) é 13 min e 20 seg. (800 segundos).

Comparando o tempo máximo permitido do motor e os tempos de disparo do relé de sobrecarga, conclui-se que o relé de sobrecarga RW27D-23 não atuou antes da temperatura de um dos enrolamentos ultrapassar a temperatura máxima permitida do motor, 130°C. Além disso, o tempo de disparo do relé de acordo com a curva característica média bipolar é maior do que o tempo máximo permitido do motor. Deste modo, o relé de sobrecarga não realiza a proteção efetiva do motor.

9.2.5 Teste de elevação de temperatura do motor partindo sob condição de falta de fase

O teste de elevação de temperatura do motor partindo sob condição de falta de fase foi realizado com a mesma montagem e procedimento dos últimos testes.

Ligou-se o motor de indução e ajustou-se o parâmetro nominal conforme especificado na plaqueta de identificação. Para este teste os valores são:

- Tensão = 380V 60Hz
- Carga mecânica $C_{\text{nominal}} = 59,9 \text{ N.m}$

Durante a partida do motor na condição de falta de fase, o motor não partiu e seu comportamento e resultados foram muito similares aos apresentados no teste de rotor bloqueado. As correntes das fases “R” e “T” apresentaram valores de corrente iguais as correntes de rotor bloqueado.

O motor funcionou nesta condição até atingir a temperatura máxima permitida em um dos enrolamentos, 130°C. Quando a temperatura máxima foi encontrada, o motor de indução foi desligado. Durante o teste, os parâmetros monitorados foram adquiridos pelo osciloscópio digital com taxa de aquisição de uma aquisição por minuto e a Figura 51 mostra o comportamento dos parâmetros monitorados no teste.

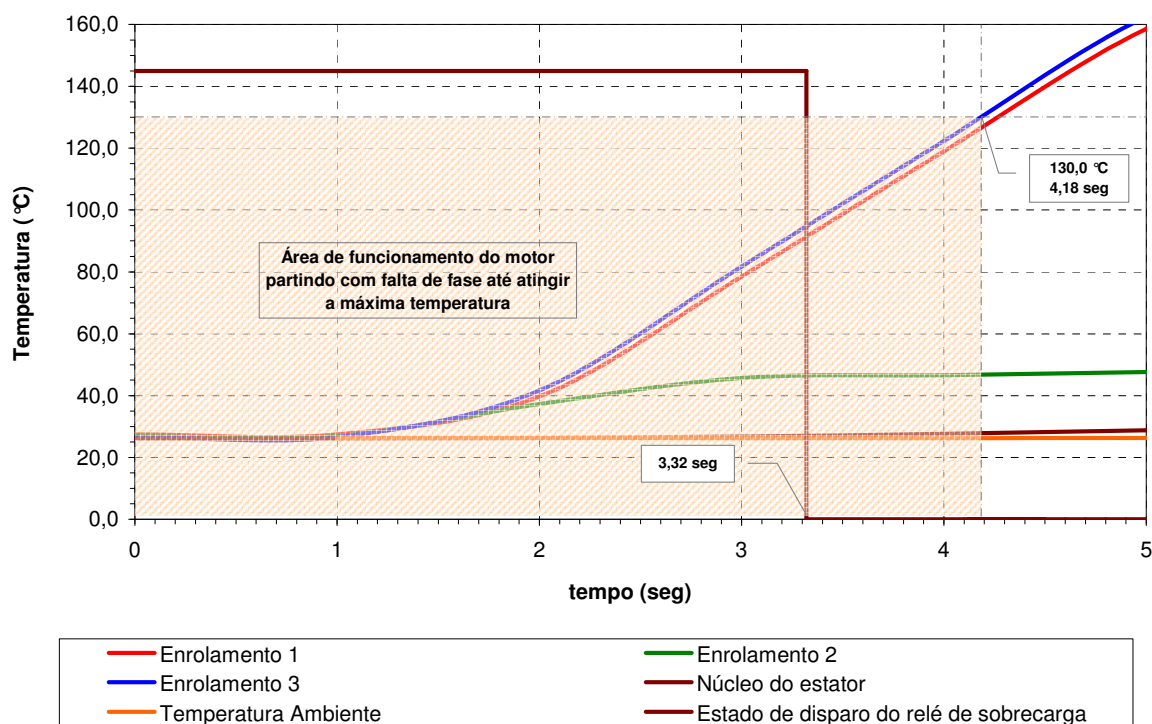


Figura 51 – Medição das temperaturas máximas do motor de indução de 11kW partindo com falta de fase

Outros dados foram medidos durante o teste e são apresentados abaixo:

$$I_{\text{nominal}} = 22,8 \text{ A}$$

$$I_{\text{falta de fase (rotor bloqueado)}} = 187,2 \text{ A } (8,21 \times I_{\text{nominal}})$$

Através da Figura 51, é possível obter os resultados do teste e os valores são apresentados na Tabela 19.

Parâmetros	Resultado
Tempo máximo permitido com falta de fase	4,18 seg.
Tempo de disparo do relé de sobrecarga térmico	3,32 seg.

Tabela 19 – Resultados obtidos do teste de partida do motor com falta de fase

O tempo de disparo do relé de sobrecarga de acordo com a curva característica bipolar média (Figura 42) é 2,45 segundos.

Comparando o tempo máximo permitido do motor e os tempos de disparo do relé de sobrecarga, conclui-se que o relé de sobrecarga propicia uma proteção efetiva do motor contra sobre-aquecimento, quando o motor está partindo sob a condição de falta de fase. O tempo de disparo do relé de sobrecarga é menor do que o tempo máximo permitido do motor.

9.3 Discussões sobre os resultados dos testes

Após a conclusão dos testes de determinação das curvas características, bipolar e tripolar, do relé de sobrecarga térmico e os testes de elevação de temperatura do motor de indução trifásico operando sob condições normais e anormais, é possível concluir que:

- Os relés de sobrecarga térmico propiciam proteção efetiva do motor contra sobre-aquecimento quando operando sob condição de rotor bloqueado.
- Os relés de sobrecarga térmico com sensibilidade à falta de fase não realizam proteção efetiva do motor contra sobre-aquecimento quando operando sob todas as condições de falta de fase.

Comparando o tempo máximo permitido teórico do motor operando sob condição de falta de fase com o tempo máximo permitido obtido pelo teste de elevação de temperatura com falta de fase e 100% de carga mecânica, os tempos são 3 min. e 6 seg. e 3 min. e 30 seg. respectivamente.

Entretanto, a constante de tempo de aquecimento usado no calculo teórico foi τ igual 20,64 min. Este valor é um valor médio estimado fornecido pelo fabricante como a constante de tempo de aquecimento padrão para todos os motores fabricados na carcaça 132M. No teste de elevação de temperatura do motor operando sob condição normal foi determinado o valor de $\tau = 22$ min., específico para o motor em teste.

Utilizando τ igual a 22 min. ao invés de 20,64 min. no calculo teórico do tempo máximo permitido para condição de falta de fase, encontra-se o tempo máximo de 3 min. e 36 seg.. Este valor é muito similar ao tempo máximo permitido obtido no teste. Deste modo, as considerações feitas para o cálculo teórico do tempo máximo permitido para condição de falta de fase é válido e o método pode ser empregado para calcular o tempo máximo permitido do motor para a condição de falta de fase.

Uma lacuna na proteção efetiva do motor contra falta de fase com a utilização de relés de sobrecarga térmico com sensibilidade à falta de fase é encontrado na operação de motores de indução trifásicos com carga parcial. Nessa situação, as correntes que passam pelas fases energizadas do relé de sobrecarga são próximas aos valores nominais. Deste modo, o sistema de medição / atuador do relé de sobrecarga não funciona bem ou com rapidez suficiente para disparar o relé e executar a proteção efetiva do motor.

A proposta de melhoria do relé de sobrecarga para cobrir a lacuna de proteção do motor será focada em um sistema específico, sistema de medição / atuador. Desta forma, busca-se que o relé seja um dispositivo de proteção efetiva contra falta de fase, além de ampliar sua gama de características.

O próximo capítulo irá apresentar um estudo e proposta de mudança e melhoria do sistema de medição / atuador dos relés de sobrecarga: sistema de bimetais por sistema de medição / atuado eletrônico.

10 Proposta de um novo sistema de proteção de motores

Conforme concluído no capítulo 9.3, os tradicionais relés de sobrecarga térmico com sensibilidade a falta de fase não fornecem proteção efetiva para o motor operando em condições normal e anormal.

Devido a isto, este capítulo tem o objetivo de propor um novo sistema de medição / atuador que realize proteção efetiva do motor em todas as condições de operação.

10.1 Proteção de motor realizada pelo relé de sobrecarga eletrônico

Por vários anos, um nível alto de proteção de motores tem sido usado. A melhoria nos protetores de motores é requerida por causa do aumento da complexidade das aplicações dos motores elétricos. As características disponíveis nos relés de sobrecarga térmico não são mais suficientes. Durante as últimas décadas, o custo dos componentes eletrônicos também reduziu e assim, a aplicação de soluções eletrônicas junto com sistemas eletromecânicos tem crescido.

A monitoração da corrente é indireta e por meio de transformadores de corrente. O uso da eletrônica permite mais características e uma maior faixa de escala de ajuste de corrente. A classe do disparo pode ser feita com maior precisão e com relativa facilidade se comparado com o sistema bimetálico.

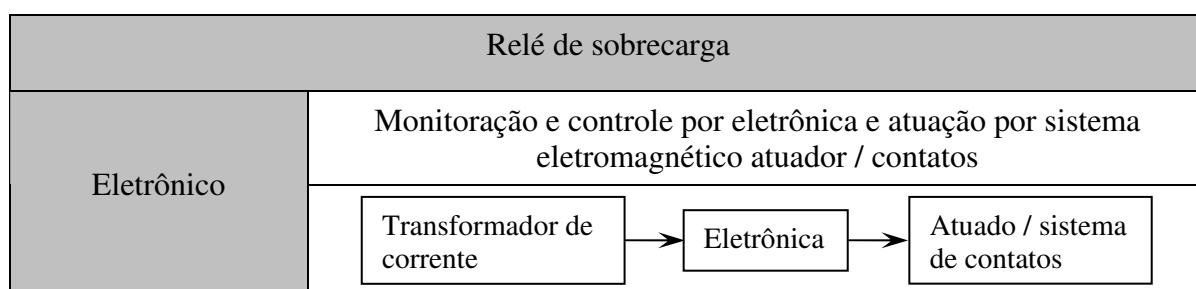


Tabela 20 – Visão geral do relé de sobrecarga eletrônico

Adicionalmente, os relés de sobrecarga eletrônico apresentam mais funções comparando com as soluções convencionais usando o bimetal. Em geral, as vantagens da eletrônica são:

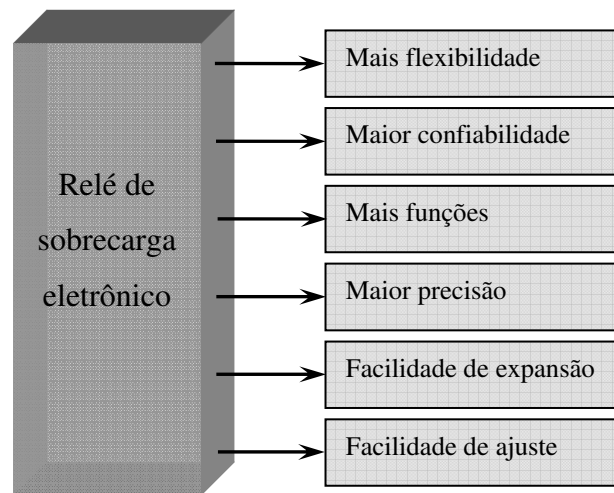


Figura 52 – Vantagens do relé eletrônico comparado com relé de sobrecarga térmico

Geralmente, a eletrônica permite uma melhor simulação de diferentes comportamentos por causa da facilidade e possibilidade de ajustes. Por exemplo, o tempo de disparo em condições de falha, pode ser facilmente ajustado e variado para diferentes situações. Se algumas situações adicionais forem requeridas, existe a oportunidade de ampliar as funções do dispositivo. As funções dos relés de sobrecarga térmicos são limitadas e dificilmente funções adicionais podem ser incrementadas de forma viável.

Uma vantagem importante de relés de sobrecarga eletrônicos é a estendida faixa de ajuste de corrente, possibilitando uma maior flexibilidade e redução de investimentos para a produção.

$$\text{relação da faixa de ajuste} = \frac{\text{maior valor de corrente}}{\text{menor valor de corrente}}$$

A relação de faixa de ajuste de corrente para o relé de sobrecarga térmico pode alcançar até 1,4, e para os relés de sobrecarga eletrônicos é de 4,0. Esta relação reduz o número de dispositivos para cobrir uma dada faixa de corrente e consequentemente os investimentos para fabricantes, distribuidores e usuários finais.

10.2 Definição do dispositivo – arranjo dos subsistemas

Para a execução de todas as funções necessárias, a organização dos subsistemas é útil de modo a permitir a investigação de diferentes possibilidades de montagem. Desse modo, é

de suma importância à definição das interfaces internas. A Figura 53 mostra a estrutura interna e as definições de conexões.

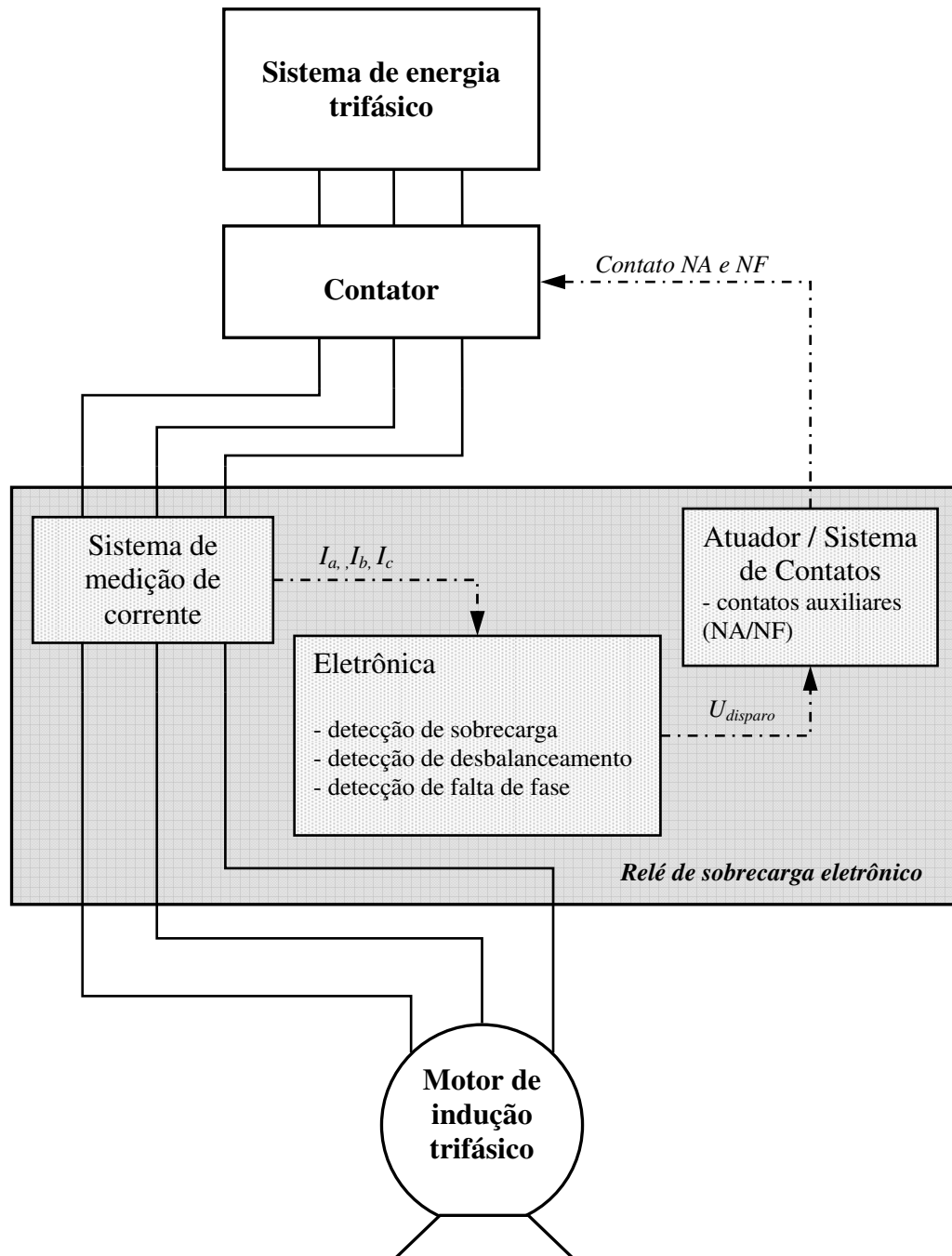


Figura 53 – Estrutura simplificada do relé de sobrecarga eletrônico e suas interfaces internas

O sistema de medição de corrente é conectado com o circuito principal do motor, monitorando a corrente conduzida pelo motor. Além disso, esta parte do relé fornece a alimentação para a eletrônica. A interface entre o sistema de medição de corrente e a eletrônica é feita eletricamente e deste modo, a informação das correntes do circuito é transmitida.

A saída da eletrônica é um sinal emitido a um atuador para disparo do dispositivo e comutação dos contatos do auxiliares.

O interesse principal deste estudo é apresentar e implementar uma proposta de um sistema novo para substituir o sistema de bimetais dos relés de sobrecarga térmico. O sistema bimetálico não executa corretamente o trabalho como sistema de medição e atuador na condição de falta de fase. Assim, o estudo é focado no sistema de medição de corrente e na eletrônica de detecção de desbalanceamento (gerador do sinal de disparo).

10.2.1 Sistema de medição de corrente

O sistema de medição de corrente é formado por um transformador de corrente, uma ponte retificadora e por 1 ou mais resistores de medição. A ponte retificadora é a unidade de conexão entre o transformador de corrente e a unidade eletrônica de detecção e processamento dos sinais, a qual é conectada diretamente ao(s) resistor(es) de medição.

Os possíveis arranjos de pontes retificadoras alimentadas por transformador de corrente são mostrados nas Figura 54 e Figura 55.

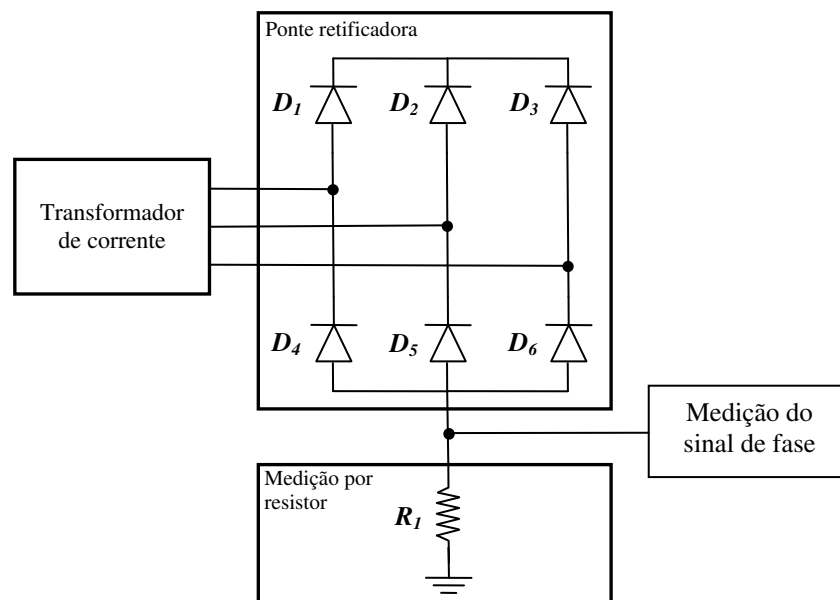


Figura 54 – Ponte retificadora com medição por resistor único

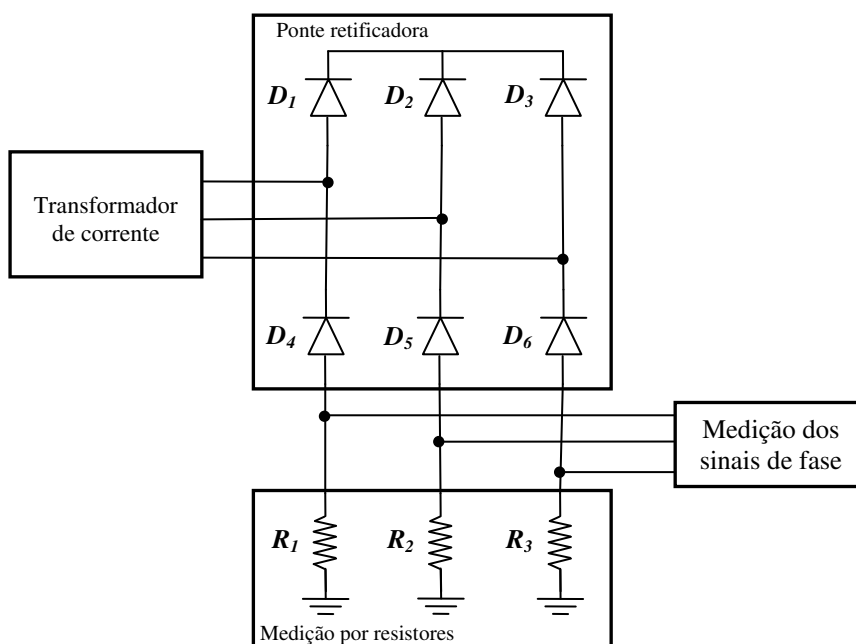


Figura 55 – Ponte retificadora com medição por múltiplos resistores

Nesses arranjos, os diodos sempre estão conduzindo e os resistores de medição são conectados à ponte retificadora. Isto é necessário para transformar as pequenas correntes do transformador em sinais. Deste modo, tem-se a transformação de corrente em tensão (I-V).

Na medição por múltiplos resistores é possível medir a corrente em cada linha da ponte retificadora, portanto, em cada linha do motor. Por outro lado, a medição com resistor único é mais fácil e transforma a soma das correntes em uma tensão. Assim, o tipo de circuito a ser usado depende do circuito de detecção. Outro argumento para a seleção da melhor solução é o fato de que o sistema de medição com resistor único pode ser usado para ajuste de corrente. Isto não é possível com o circuito de medição por múltiplos resistores porque todas as três fases devem variar igualmente.

10.2.2 Detecção de desbalanceamento

O circuito de detecção de desbalanceamento é a parte eletrônica para medição da tensão de saída no circuito sistema de medição de corrente e para a detecção do desbalanceamento. A falta de fase é o caso mais severo de desbalanceamento e está inclusa nessa detecção.

É apresentado abaixo algumas possibilidades para definir o circuito de detecção de desbalanceamento:

a) Comparação fase - fase

Esta opção baseia-se nos diferentes comportamentos das correntes nas fases “R”, “S” e “T” durante a condição de desbalanceamento.

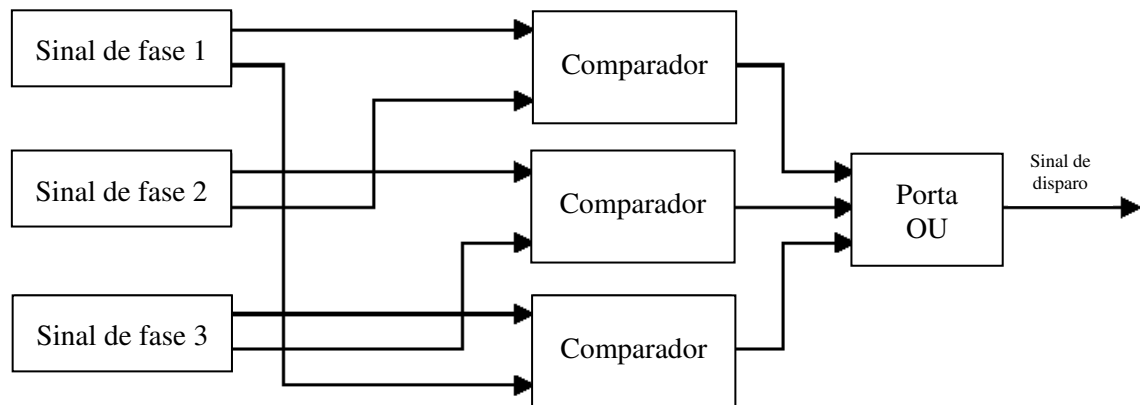


Figura 56 – Circuito de comparação fase - fase

Conforme mostrado na Figura 56, cada fase é comparada com uma das outras. Se uma condição de desbalanceamento acontecer, existirá uma diferença significativa na amplitude das fases. Este fato é usado para detecção por comparação em cada uma das outras

b) Comparação fase - média

A Figura 57 mostra o princípio do circuito de comparação fase-média. O sinal de cada fase é comparado com o sinal médio. Se o sinal de uma das fases for menor do que o nível predeterminado do sinal médio, o sinal de falta acontece.

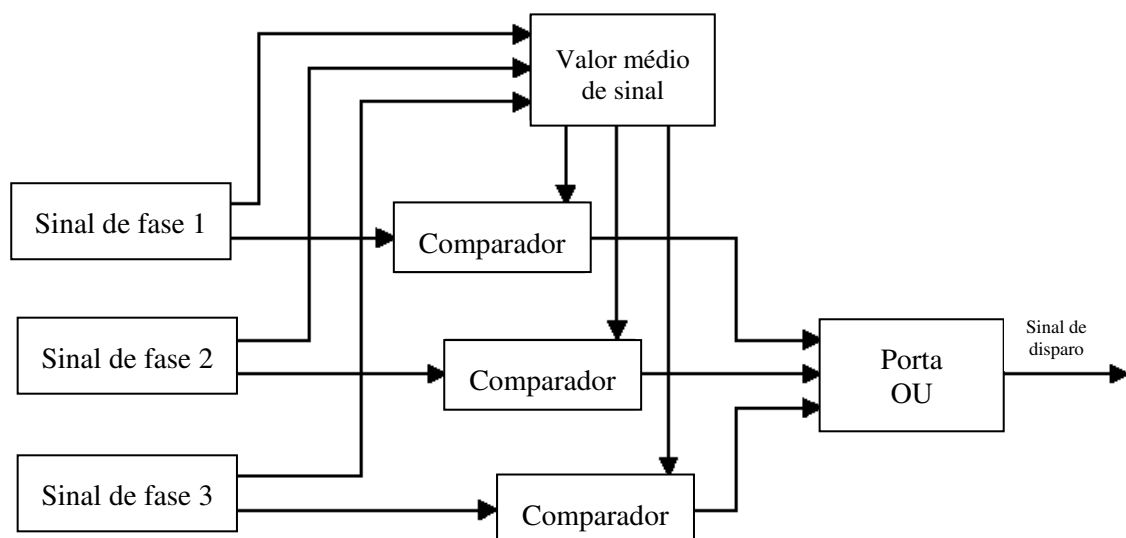


Figura 57 – Circuito de comparação fase - média

c) Comparação instantânea de pico

A diferença entre esse circuito e os demais apresentados acima é que este utiliza apenas um resistor de medição e a detecção por pico é facilmente implementada com circuitos analógicos. A idéia principal é detectar o pico do sinal e compará-lo com o sinal instantâneo. Mas problemas podem acontecer devido ao atraso de detecção de pico, gerando um sinal de disparo não desejado. A utilização de um simples sistema temporizador evita esse tipo de situações indesejáveis.

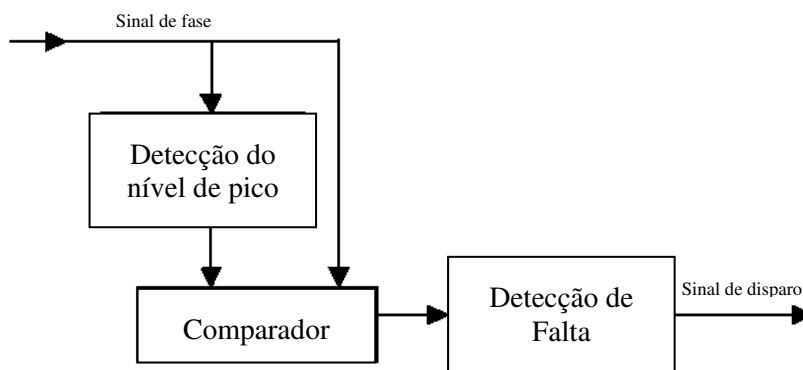


Figura 58 – Circuito de comparação instantânea de pico

Encontradas as opções de soluções é importante identificar as estruturas e relacioná-las de acordo com a funcionalidade e especificações. A Figura 59 apresenta as opções encontradas nas investigações. As linhas pontilhadas mostram as conexões possíveis entre as partes e os blocos sombreados ilustram os sistemas escolhidos.

Deste modo, como se necessita da utilização do resistor de medição para ajuste de corrente, a escolha é direcionada para o uso do circuito detector de desbalanceamento por detecção instantânea de pico.

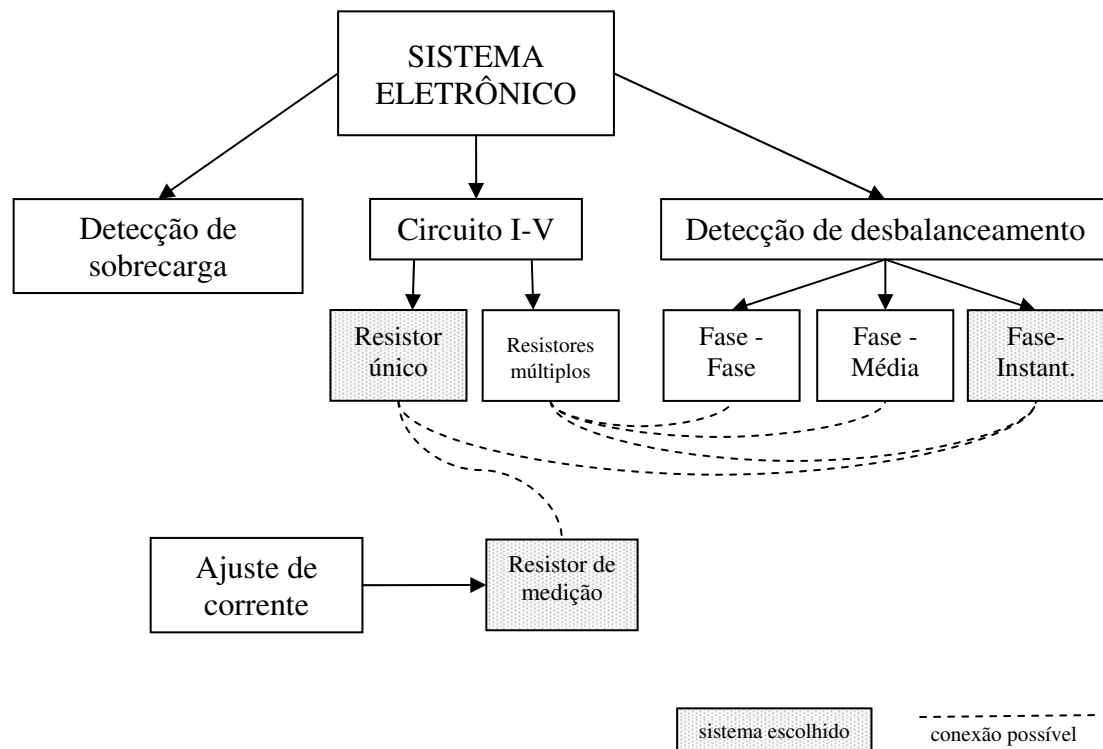


Figura 59 – Escolha dos sistemas do relé de sobrecarga eletrônico

A estrutura principal da eletrônica é resultado das possibilidades apresentadas na Figura 59. A estrutura principal do sistema de medição consiste de um retificador e o resistor de medição. Adicionalmente à estrutura de detecção de desbalanceamento ainda se encontra o sistema de comparação instantânea de pico e circuito de disparo. Deste modo, a estrutura principal com as funções requeridas são encontradas e apresentadas na Figura 60

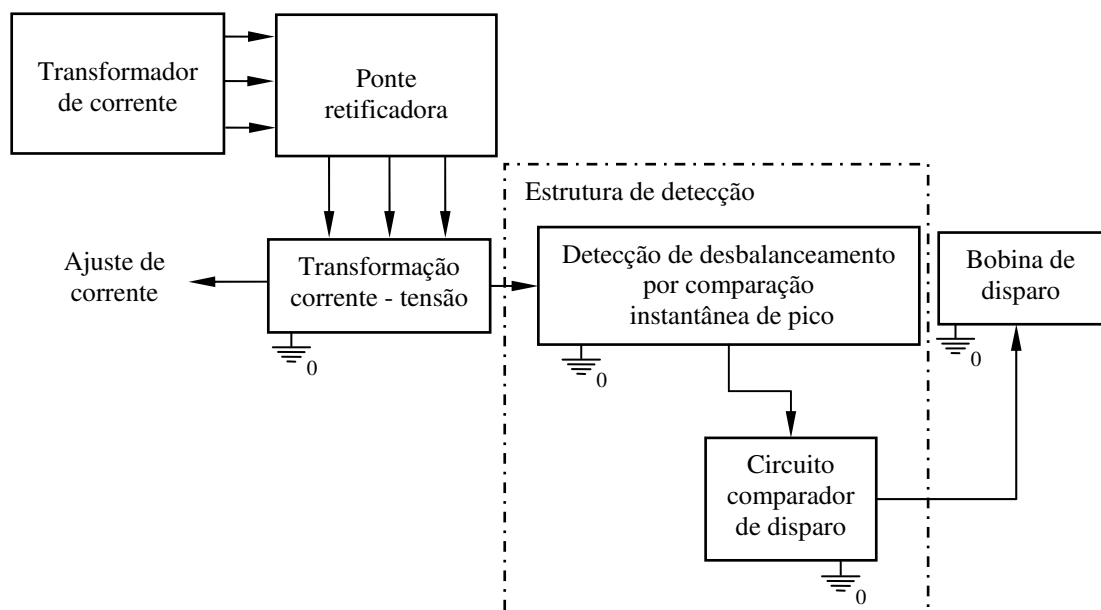


Figura 60 – Estrutura principal do sistema de medição e detecção de desbalanceamento

10.3 Circuito eletrônico

A estrutura principal do sistema de medição e detector de desbalanceamento (Figura 60) foi desenvolvida e descrita detalhadamente abaixo e conforme a Figura 61.

Os transformadores de corrente são conectados ao retificador e o circuito é fechado via resistor de medição. O arranjo dos componentes formados pelo resistor de medição e retificador são importantes para o cálculo da carga do transformador de corrente. As outras partes possuem alta impedância e assim não influenciam na corrente. O objetivo principal é evitar interações e conseguir um sinal de medição confiável.

O resistor de medição converte os pequenos sinais de corrente em tensões para o circuito de detecção. Nesse ponto, com um resistor, R_1 , o relé pode ser ajustado para a corrente nominal do motor.

O circuito de detecção de desbalanceamento consiste, no primeiro estágio, de um amplificador, AP_1 , que fornece sinais confiáveis e alta impedância para evitar interações do circuito de detecção com o circuito de medição. M_6 é o sinal de saída do amplificador AP_1 , que é o sinal amplificado do sinal medido pelo resistor de medição.

Através do circuito detector de pico, formado pelo Ampop AP_2 , resistor R_4 e capacitor C_1 , o sinal M_{10} é encontrado. O sinal M_{10} é a envoltória (sinal de pico) da entrada M_2 . M_2 é um percentual do sinal M_6 , que é definido por um divisor de tensão formado pelos resistores R_2 e R_3 . Este percentual também define o valor limite de desbalanceamento para disparo do circuito de detecção. O circuito formado pelo Ampop AP_3 é um subtrator (entrada inversora) do valor de pico do sinal M_{10} , e o valor instantâneo do sinal M_6 . Quando M_6 é maior que M_{10} , a saída M_{11} é zero. Contudo, quando M_6 é menor do que M_{10} , a saída é nível alto (tensão de referência). Assim, o capacitor C_2 começa a carregar e forma o sinal RMS. Deste modo, o sinal de disparo é gerado para energizar a bobina de disparo.

O resistor R_5 e o capacitor C_2 definem indiretamente a constante de tempo de disparo por desbalanceamento. Para complementar o circuito de detecção de desbalanceamento, um temporizador adicional é implementado para evitar disparo indesejável por causa de mudanças lentas do valor de pico. Caso contrário, o tempo de disparo é determinado por R_5 e C_2 . Se a bobina de disparo é energizada, o relé de sobrecarga eletrônico desliga o contator e assim, a alimentação do motor é desconectada.

Para o melhor entendimento da operação do circuito e a obtenção dos principais sinais foram realizadas algumas simulações usando o software de simulações P-Spice e que serão detalhadas no próximo item.

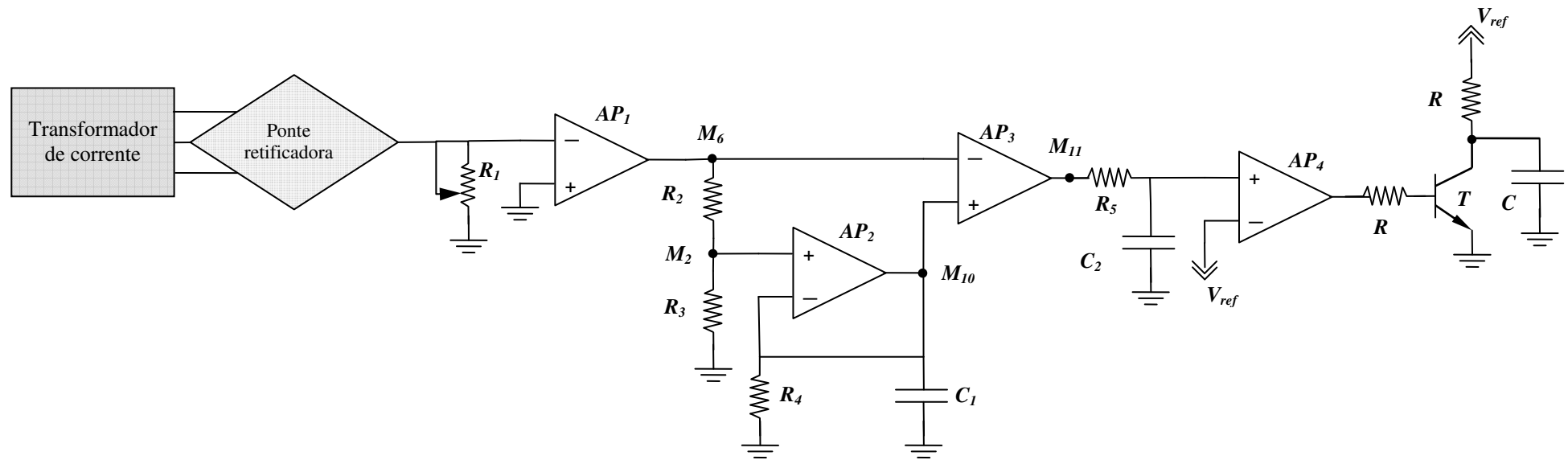


Figura 61 – Circuitos de medição e de detecção de desbalanceamento do relé de sobrecarga eletrônico

10.4 Simulação do circuito eletrônico em P-Spice

Após a definição do sistema de medição e do circuito eletrônico de detecção de desbalanceamento, Figura 61, e usando o software de simulação P-Spice, foi possível a obtenção dos principais sinais e melhor entendimento de seus comportamentos em todas as condições de operação do motor. Os principais sinais do circuito eletrônico são M_6 , M_2 , M_{10} e M_{11} , onde:

M_6 é o sinal amplificado, obtido no resistor de medição;

M_2 é o percentual de M_6 . Este valor define o limite de desbalanceamento para disparo do circuito de detecção;

M_{10} é o sinal da envoltória (sinal de pico) de M_2 ;

M_{11} é o sinal gerado para energizar a bobina de disparo.

O circuito eletrônico foi implementado no P-Spice conforme definido e mostrado na Figura 61. Através do circuito, foi possível a aplicação de diferentes sinais de entrada de modo a simular algumas condições de alimentação do motor.

Três diferentes sinais de entrada foram usados para simular e avaliar o circuito eletrônico: alimentação trifásica nominal, alimentação com 40% de desbalanceamento e alimentação com falta de uma fase.

O primeiro sinal de entrada foi uma alimentação trifásica nominal, usando três sinais senoidais com mesma amplitude e defasados 120 graus entre eles (alimentação padrão de redes elétricas).

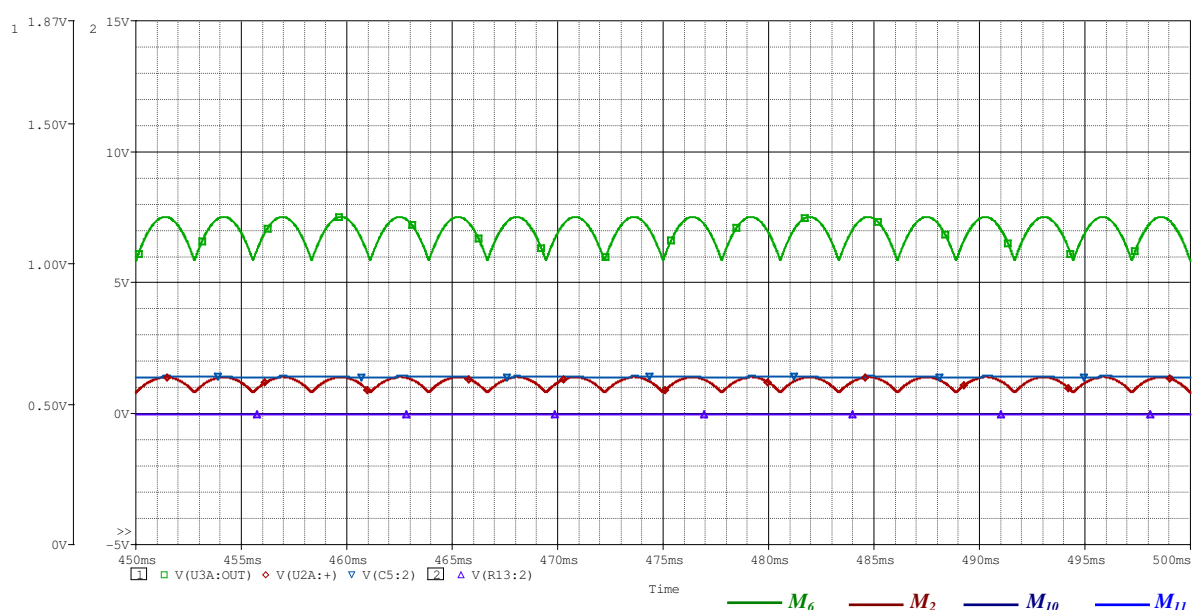


Figura 62 – Sinais M_6 , M_2 , M_{10} e M_{11} do relé de sobrecarga eletrônico operando sob condição normal

A Figura 62 mostra os sinais M_6 , M_2 , M_{10} e M_{11} do circuito eletrônico de detecção de desbalanceamento operando com alimentação trifásica nominal (condição normal).

Conforme esperado, o sinal M_6 é um sinal retificado medido através do resistor de medição, M_2 é aproximadamente a metade de M_6 (R_2 e R_3 possuem valores iguais) e M_{10} é a envoltória do sinal M_2 .

Nesta condição, o sinal M_6 é maior que M_{10} e a saída M_{11} é nula. Assim nenhum sinal é gerado para carregar o capacitor e energizar à bobina de disparo, e consequentemente disparar o relé.

O segundo sinal de entrada foi uma alimentação com desbalanceamento. Os sinais de entrada foram dois sinais senoidais com amplitudes iguais e outro sinal senoidal com 40% da amplitude dos demais. Isto significa 40% de desbalanceamento em uma fase.

A Figura 63 mostra os sinais M_6 , M_2 , M_{10} e M_{11} do circuito eletrônico sob condição de desbalanceamento.

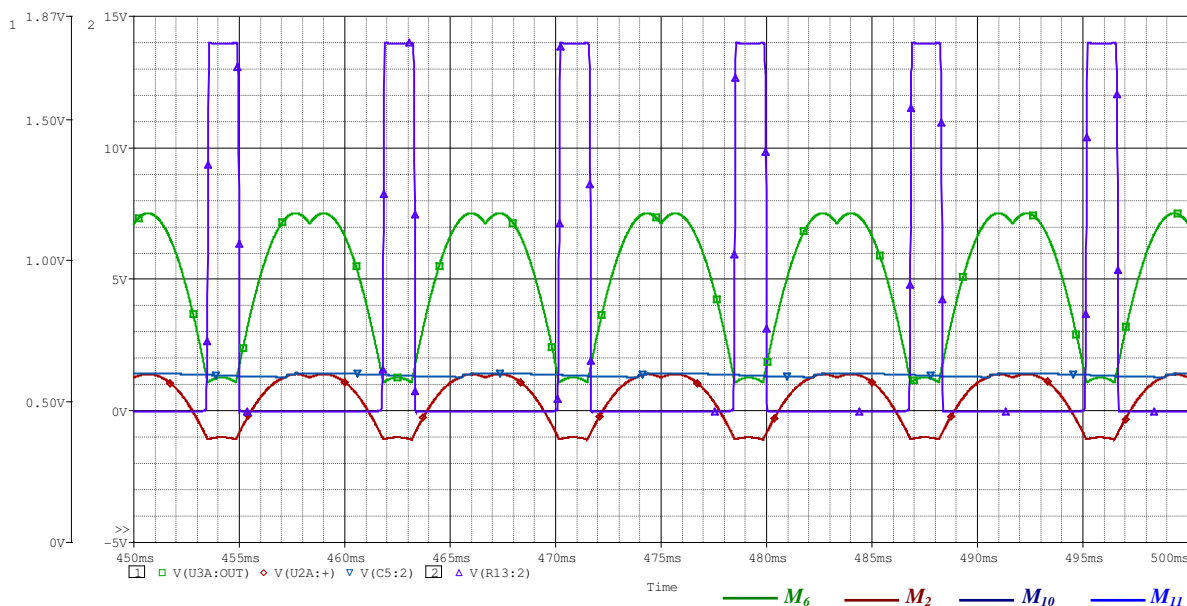


Figura 63 – Sinais M_6 , M_2 , M_{10} e M_{11} do relé de sobrecarga eletrônico operando sob condição de desbalanceamento

Como uma das fases estava desbalanceada, amplitude reduzida, o sinal retificado M_6 mudou. No instante que o sinal M_6 atingiu o valor de M_{10} , a saída M_{11} muda de zero para nível alto. M_{11} permanece em nível alto até que M_6 supere novamente o valor de M_{10} .

Nesse período, pulsos em M_{11} são gerados. O capacitor C_2 começa a carregar e formar o sinal RMS e deste modo, a bobina de disparo é energizada e acontece a comutação dos contatos auxiliares do relé de sobrecarga.

A última simulação foi uma alimentação com falta de fase. Os sinais de entrada eram apenas dois sinais senoidais com mesma amplitude. A outra entrada foi deixada em zero.

A Figura 64 apresenta os sinais M_6 , M_2 , M_{10} e M_{11} do circuito eletrônico de detecção de desbalanceamento sob a condição de falta de fase.

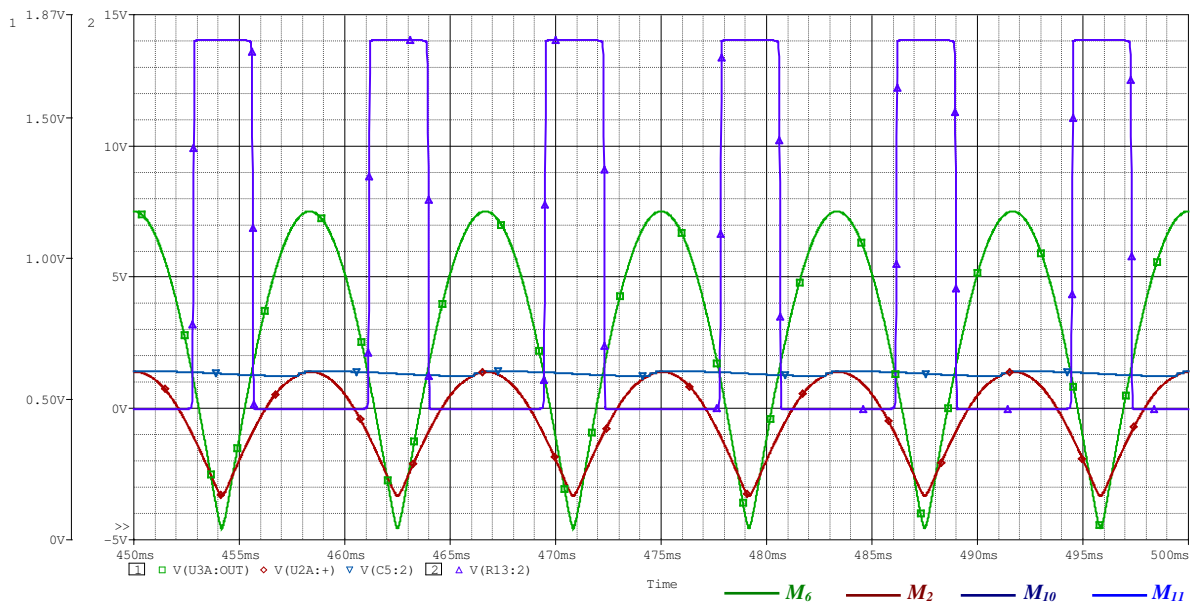


Figura 64 – Sinais M_6 , M_2 , M_{10} and M_{11} do relé de sobrecarga eletrônico operando sob condição de falta de fase

A operação em falta de fase é o caso crítico de desbalanceamento, assim, como no desbalanceamento, o instante que o sinal M_6 atinge o valor de M_{10} , a saída M_{11} muda de zero para nível alto. M_{11} permanece em nível alto até M_6 aumentar e superar novamente o valor de M_{10} . Enquanto o sinal M_6 é menor que o sinal M_{10} , pulsos são gerados em M_{11} , e o capacitor C_2 começa a carregar. Deste modo à bobina de disparo é energizada e os contatos auxiliares do relé de sobrecarga são comutados.

O tempo de disparo por desbalanceamento é definido pela constante de tempo R_5C_2 . Normalmente o tempo de disparo por desbalanceamento é 3 segundos. Este valor é fixo e suficientemente rápido para realizar a proteção efetiva do motor operando sob condições anormais: rotor bloqueado, desbalanceamento e falta de fase.

10.5 Desenvolvimento de protótipo e validação da simulação

Nos últimos capítulos foi feita uma proposta de mudança do sistema de bimetálicos dos relés de sobrecarga térmico para um novo sistema de medição / atuador eletrônico, bem como as simulações do novo sistema sob condições anormais. Este novo sistema deve realizar a proteção efetiva do motor operando sob condições anormais como rotor bloqueado, desbalanceamento e falta de fase.

Os resultados obtidos das simulações pelo software de simulação P-Spice mostrou que o sistema proposto funciona bem e de acordo com os requisitos para proteção de motores.

Os próximos passos para validação da proposta é o desenvolvimento de um protótipo do circuito eletrônico de detecção de desbalanceamento, medição dos principais e comparação com as simulações do P-Spice.

Foi desenvolvida uma placa de circuito impresso, Figura 65, usando a estrutura principal do sistema de medição e do circuito de detecção de desbalanceamento como apresentado na Figura 61.

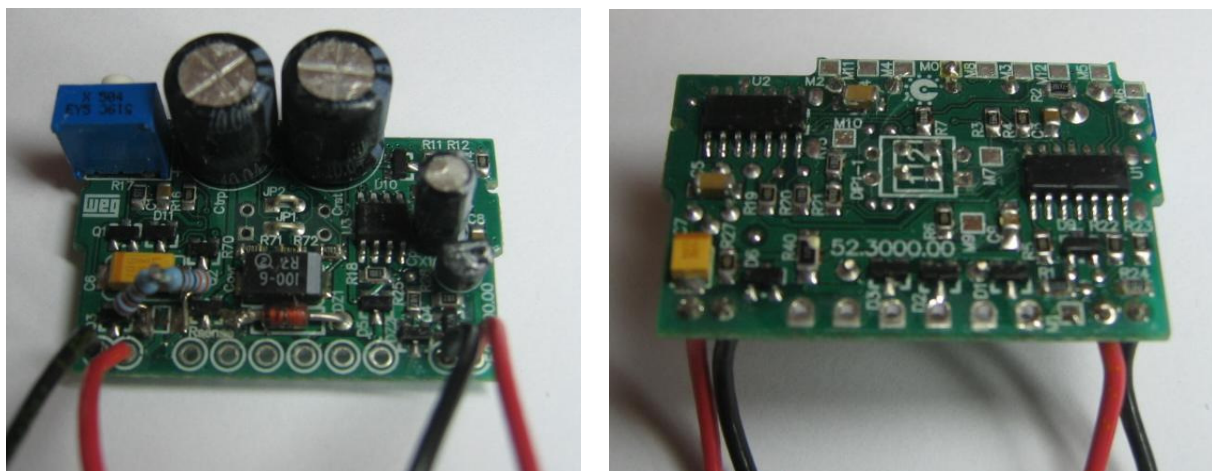


Figura 65 – Protótipo da placa de circuito impresso

No protótipo, os pontos dos principais sinais M_6 , M_2 , M_{10} e M_{11} foram arranjados de forma a facilitar as medições.

O protótipo da placa de circuito impresso foi conectado com os três transformadores de corrente, um por fase. As conexões dos transformadores de corrente foram as entradas da ponte retificadora trifásica na placa de circuito impresso.

A Figura 66 mostra o sistema completo, sistema de medição e atuador, conectado e preparado para os testes.

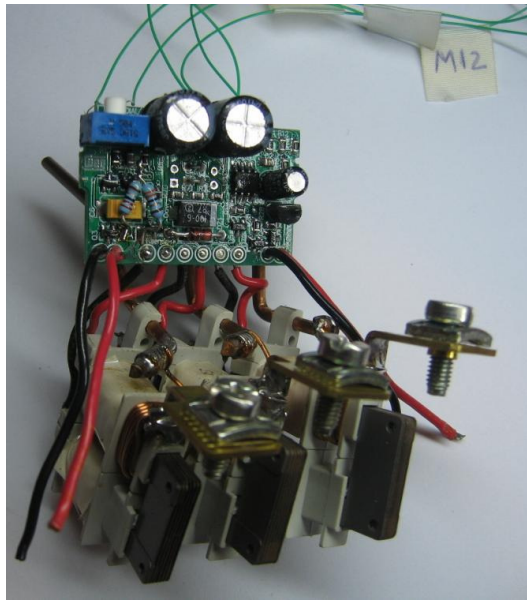


Figura 66 – Protótipo do sistema de medição e atuador

Os testes no protótipo foram feitos usando uma fonte de corrente trifásica com 3 variadores independentes e um osciloscópio digital Tektronix.

A fonte de corrente trifásica foi usada para gerar a corrente trifásica que passa pelas fases do relé e do motor nas aplicações. O osciloscópio digital foi utilizado para aquisição dos principais sinais do protótipo do circuito eletrônico.

A montagem completa dos testes é mostrada na Figura 67.

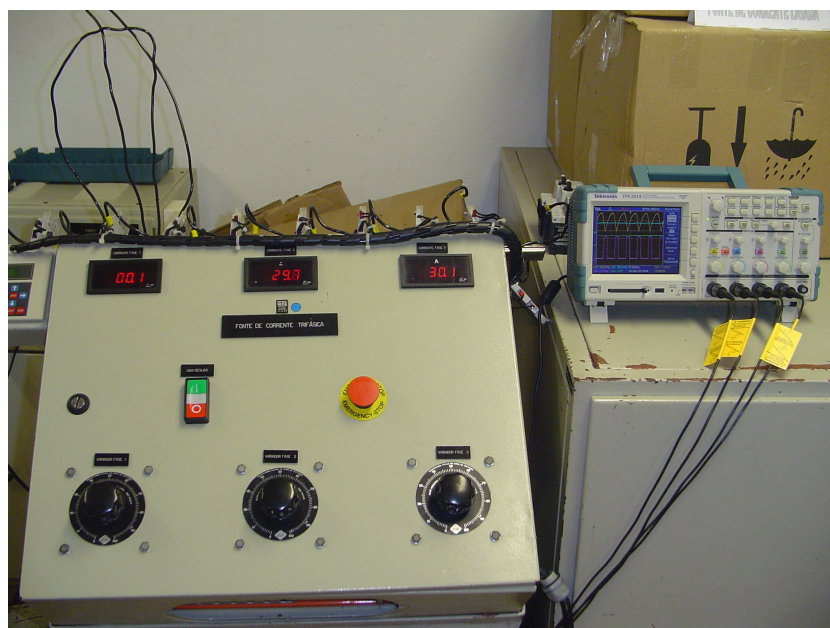


Figura 67 – Montagem completa dos testes no protótipo

Para validação do protótipo, as três diferentes condições de sinais de entrada usadas na simulação com o P-Spice também foi realizada no protótipo. Assim, foi possível avaliar o comportamento do circuito eletrônico sob alimentação trifásica nominal, desbalanceamento e falta de fase.

O primeiro teste foi realizado aplicando uma corrente trifásica de 30 A nos terminais de entrada dos transformadores de corrente. Esta condição simula a operação normal do motor e os sinais nos pontos M_6 , M_2 , M_{10} e M_{11} do protótipo são apresentados Figura 68

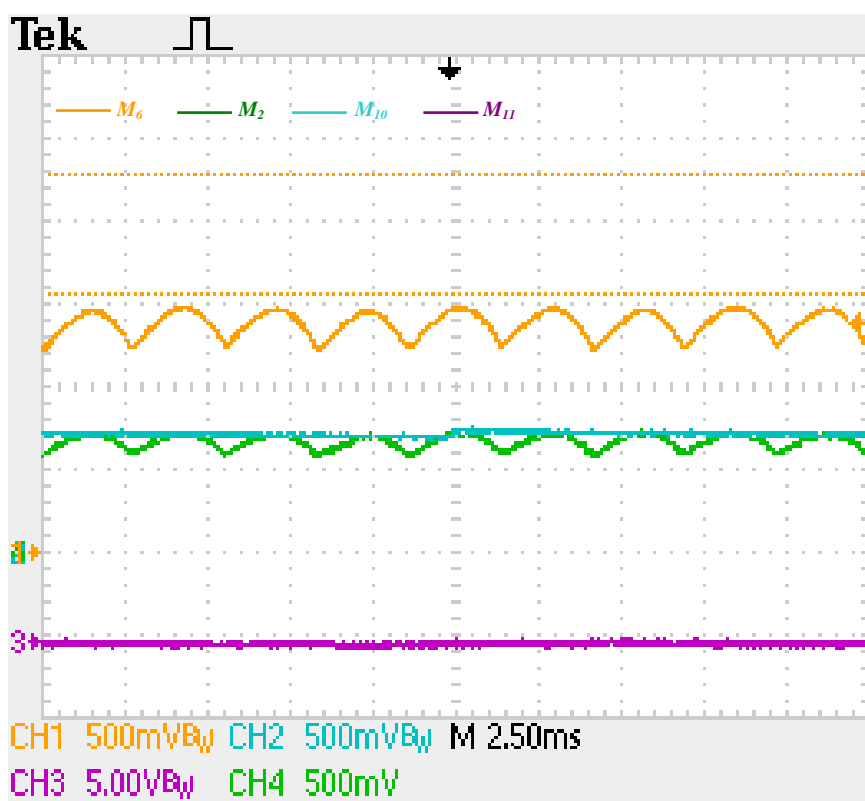


Figura 68 – Sinais M_6 , M_2 , M_{10} e M_{11} do relé de sobrecarga eletrônico operando sob condição normal

A Figura 69 mostra uma comparação entre os sinais resultantes do protótipo e da simulação com o P-Spice. Ambos os comportamentos são similares.

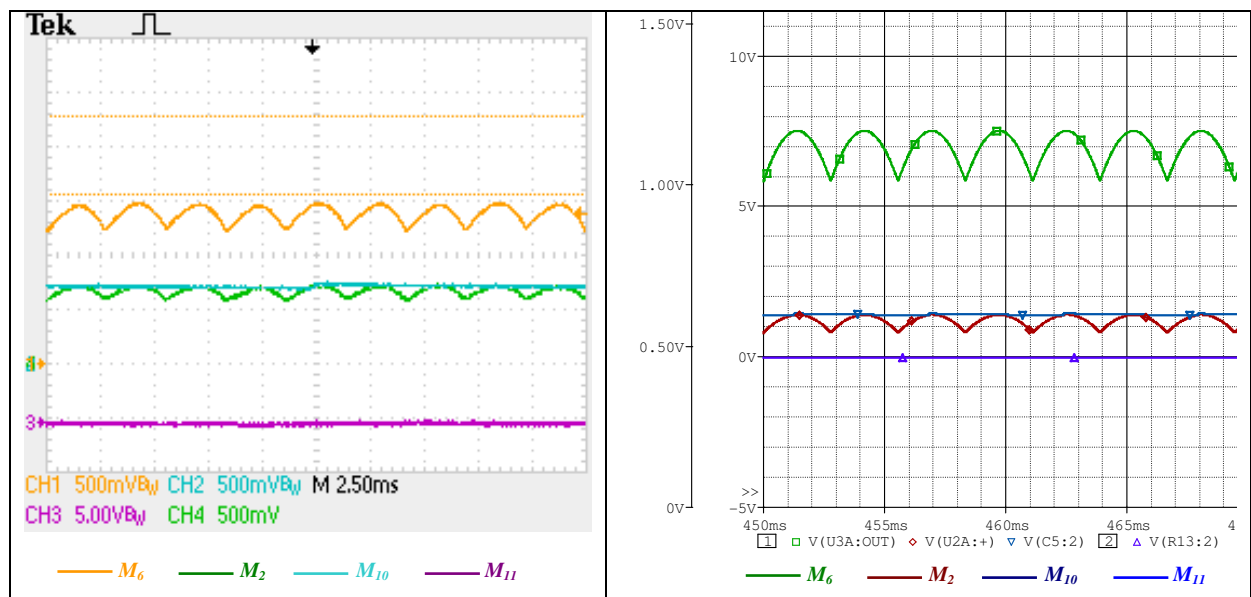


Figura 69 – Comparação entre a simulação com P-Spice e o protótipo sob condição normal

Os resultados do segundo teste são apresentados na Figura 70. Nesse teste, foi simulada uma condição de desbalanceamento, onde a amplitude de uma das fases foi reduzida para 10 A e as outras duas fases foram mantidas em com amplitude de 30 A. Isto representa um desbalanceamento de 33%.

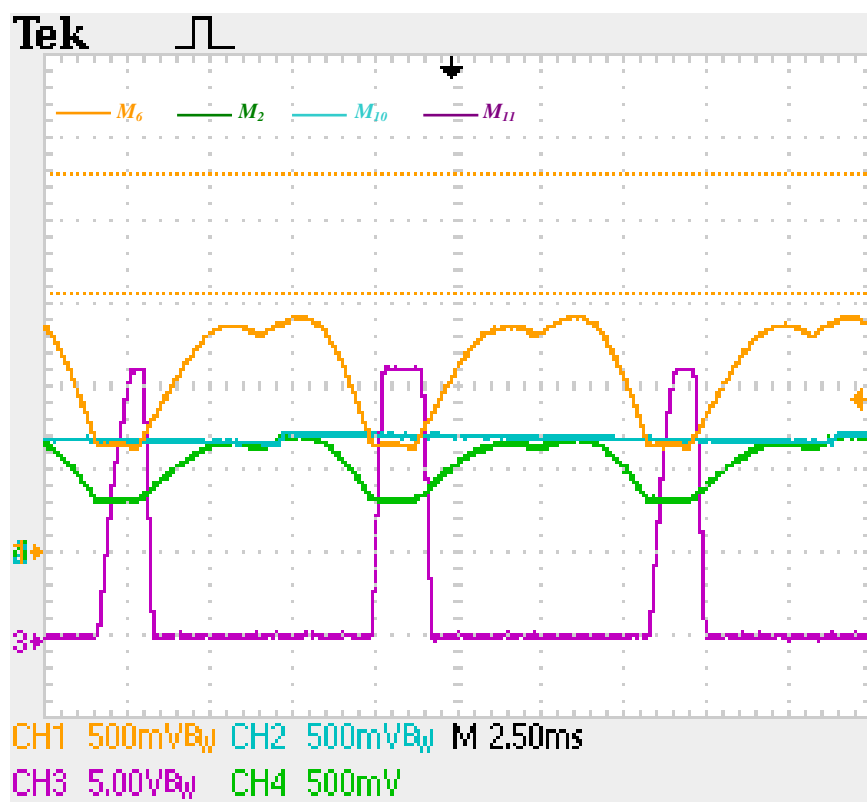


Figura 70 – Sinais M_6 , M_2 , M_{10} e M_{11} do relé de sobrecarga eletrônico operando sob condição de desbalanceamento

A Figura 70 mostra que o sinal M_6 da ponte retificadora diminuiu e no instante que o sinal M_6 atinge o valor de M_{10} , o sinal de saída M_{11} muda de nível gerando um pulso. O sinal M_{11} permanece em nível alto até que M_6 aumenta e ultrapassa novamente o valor de M_{10} .

Quando os pulsos em M_{11} são gerados, o capacitor C_2 começa a carregar e energiza a bobina de disparo e deste modo, comuta os contatos auxiliares do relé de sobrecarga.

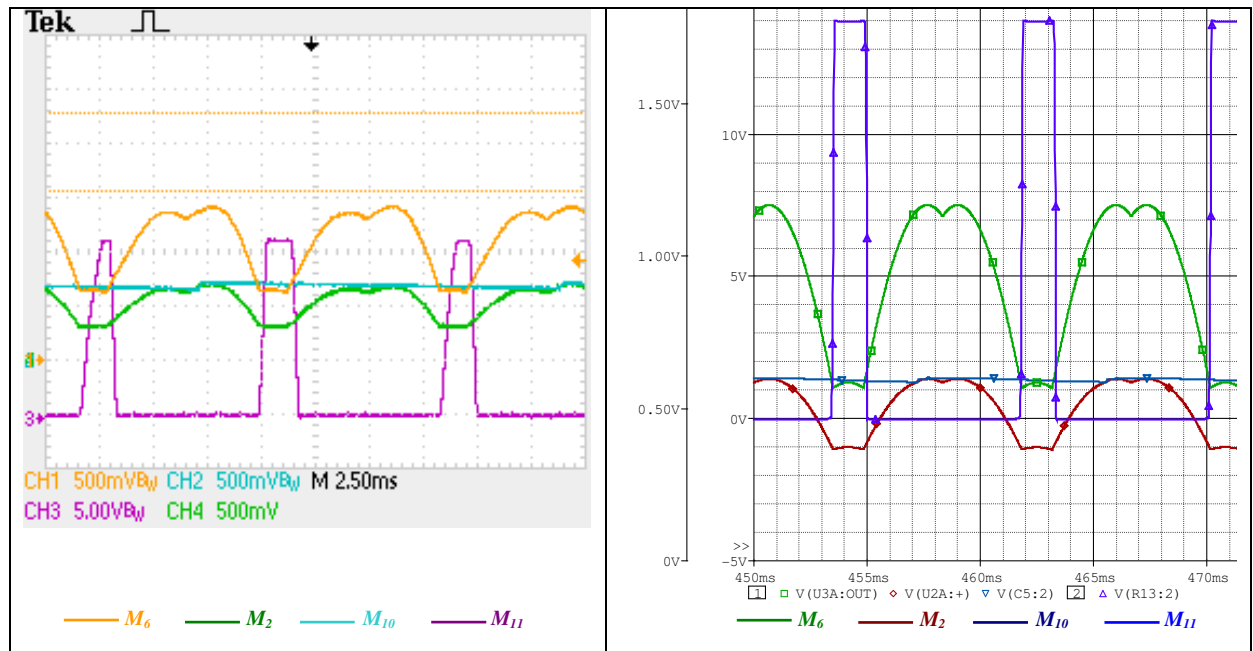


Figura 71 – Comparação entre a simulação com P-Spice e o protótipo sob condição de desbalanceamento

Comparando os sinais da Figura 70 com os da simulação pelo P-Spice, Figura 71, é possível observar os mesmos efeitos e comportamentos em ambos os casos.

A ultima condição de teste foi a de falta de fase. A amplitude de uma das fases foi reduzida a zero e as outras duas foram mantidas com amplitude de 30 A. O resultado do teste nesta condição é apresentado na Figura 72.

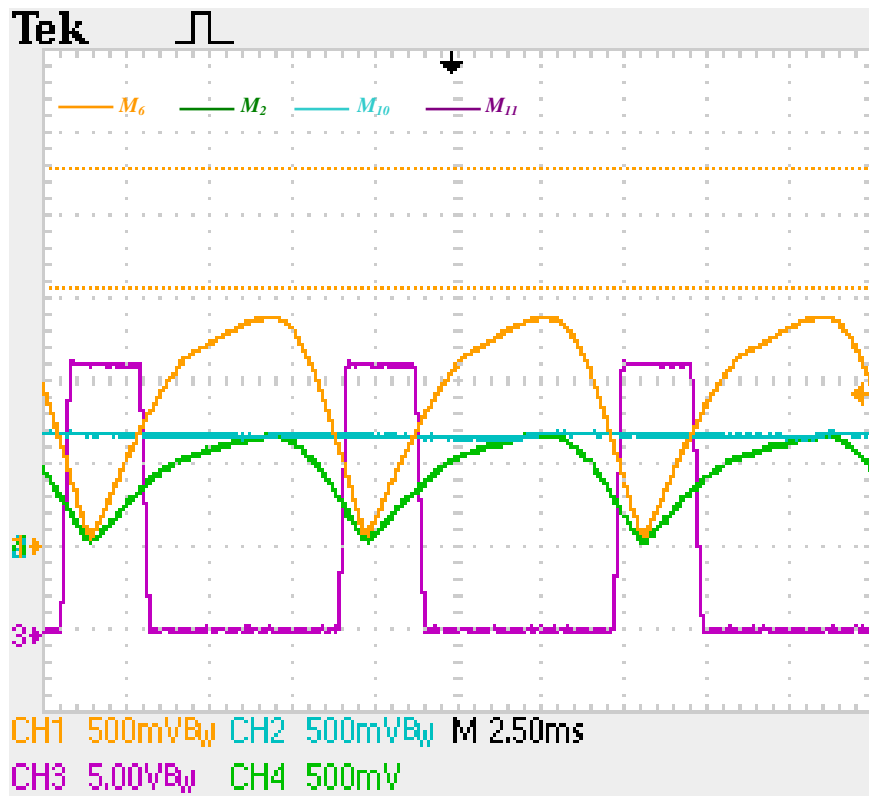


Figura 72 – Sinais M_6 , M_2 , M_{10} e M_{11} do relé de sobrecarga eletrônico operando sob condição de falta de fase

Do mesmo modo como observado na condição de desbalanceamento, com apenas duas fases energizadas (falta de fase), o sinal da ponte retificadora, M_6 , mudou. No instante que o sinal M_6 atingiu o valor do sinal M_{10} , o sinal de saída M_{11} mudou de zero para nível alto.

Como o sinal M_6 é menor do que o sinal M_{10} , pulsos são gerados em M_{11} , e o capacitor C_2 começa a carregar e energiza a bobina de disparo e deste modo, comuta os contatos auxiliares do relé de sobrecarga.

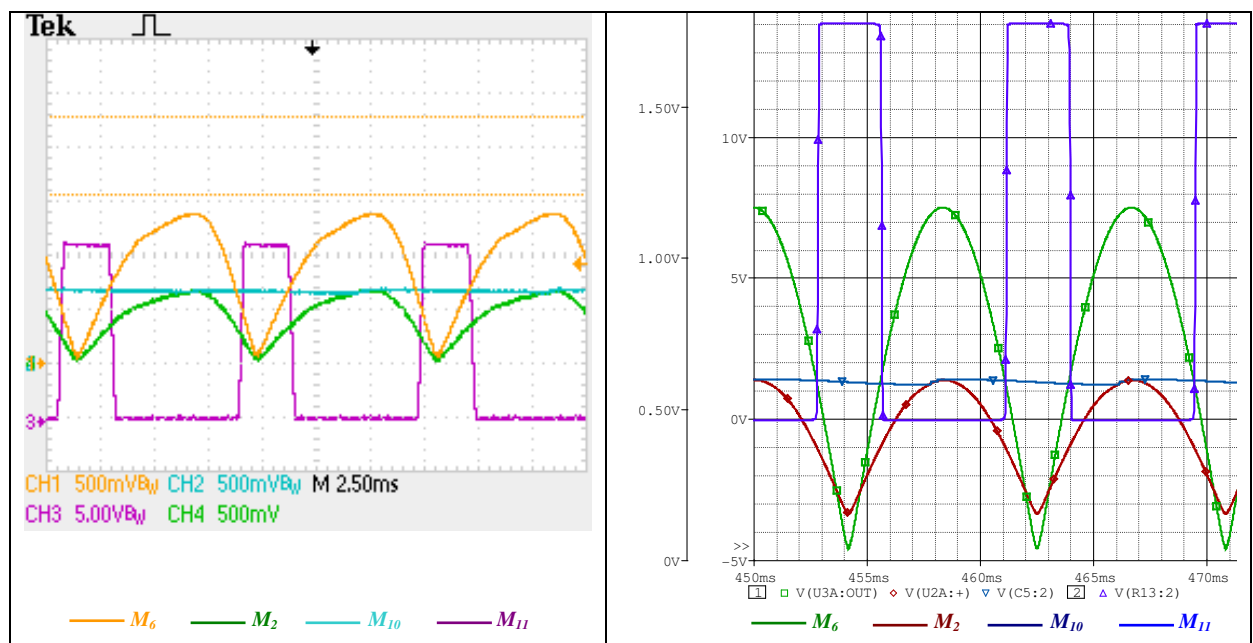


Figura 73 – Comparação entre a simulação com P-Spice e o protótipo sob condição de falta de fase

A comparação completa entre os resultados dos testes realizados com o protótipo e as simulações com o P-Spice permite concluir que o sistema eletrônico atende completamente os requisitos de proteção de motores. A proposta do sistema eletrônico medição / atuador propicia uma proteção efetiva do motor sob condições de operação anormal como rotor bloqueado, desbalanceamento e falta de fase.

Comparando o sistema proposto com o sistema de bimetais, é importante destacar a inclusão da proteção contra desbalanceamento além da proteção efetiva contra falta de fase contra possuir sensibilidade a falta de fase.

A tabela 22 apresenta uma comparação entre o relé de sobrecarga térmico e a nova proposta do relé de sobrecarga eletrônico.

Relés de sobrecarga	Térmico	Eletrônico
Faixa de trabalho	1,4 ... 1,6	3,2 ... 4
Precisão de disparo (sobrecarga)	$\pm 5\%$	$\pm 1\%$
Rotor bloqueado	protegido	protegido
Falta de fase	~ 40s (sensibilidade)	3s
Desbalanceamento	não oferece	3s
Possibilidade de extensão de funções	não é possível	possível
Consumo	6W	150mW

Tabela 21 – Comparação entre o relé de sobrecarga térmico e eletrônico

Adicionalmente, é muito importante salientar que gradativamente os sistemas eletrônicos têm sido usados cada vez mais juntos ou embarcados com sistemas mecânicos. Contudo, na maioria das aplicações onde algumas características como isolamento galvânica, trabalho em altas temperaturas, sistemas de potência entre outros, os sistemas mecânicos são essenciais e suas substituições por outros sistemas são muito difíceis.

11 Conclusões e resultados

As conclusões e resultados dessa dissertação são partes de um projeto e serão usados em desenvolvimentos com a WEG Industrias. Este trabalho tinha dois objetivos principais: avaliar a performance do relé de sobrecarga térmico na proteção de motores de indução trifásico que estão funcionando em regime contínuo (S1), contra rotor bloqueado e falta de fase e propor melhorias para a proteção efetiva dos motores elétricos. Além de criar uma base teórica para auxiliar em novos desenvolvimentos e melhorias nessa área de pesquisa.

Em busca disso, o motor de indução trifásico foi submetido a diversas investigações e análises quando operando sob condições anormais de rotor bloqueado e falta de fase, bem como os dispositivos de proteção.

O primeiro passo foi conhecer as características gerais dos motores elétricos, principalmente dos motores de indução trifásico, que são os motores elétricos mais utilizados industrialmente, e definir as variáveis relacionadas à vida elétrica e seus limites.

A vida elétrica útil depende quase que exclusivamente da vida da isolamento dos enrolamentos e que por sua vez dependem da temperatura de trabalho do motor. Os valores de temperatura dos motores elétricos são diretamente relacionados com os valores limites de projeto. Dissipação térmica, elevação de temperatura, classe de isolamento e temperatura máxima permitida são as principais características térmicas dos motores elétricos e elas foram estudadas e avaliadas neste trabalho.

Conhecendo as principais características térmicas e a avaliação do pior caso de ligação do motor na condição de falta de fase, ligação em delta, foi possível deduzir o tempo máximo permitido do motor para a condição de falta de fase. Deste modo, o tempo máximo permitido de um motor de indução trifásico de 11kW 380V 60Hz, uma das potencias mais utilizadas em aplicações industriais, foi calculado.

Foram necessários alguns testes experimentais e medições, sempre utilizando o motor ligado no pior caso, para analisar a proteção efetiva de motores por relés de sobrecarga térmico quando o motor está operando sob as condições de rotor bloqueado e falta de fase. Os testes experimentais foram:

- Teste de determinação das curvas características do relé de sobrecarga térmico;
- Teste de elevação de temperatura do motor sob condição normal;
- Teste de elevação de temperatura do motor sob condição de rotor bloqueado;
- Teste de elevação de temperatura do motor sob condição de falta de fase.

Baseando-se nos resultados dos testes e comparações dos tempos máximos permitidos, foi possível concluir que os relés de sobrecarga térmicos realizam proteção efetiva do motor contra sobre-aquecimento na condição de rotor bloqueado e não executa proteção efetiva contra sobre-aquecimento do motor na condição de falta de fase. Uma lacuna na proteção efetiva do motor contra falta de fase com a utilização de relés de sobrecarga térmico com sensibilidade à falta de fase é encontrada na operação de motores de indução trifásico com carga parcial

De modo a cobrir essa lacuna de proteção do motor, além de ampliar a gama de características, uma proposta de melhoria no sistema de medição / atuador do relé de sobrecarga térmico foi feito. A proposta sugere a mudança do sistema de bimetais (sistema de medição / atuador) do relé de sobrecarga térmico por um sistema de medição / atuador eletrônico.

Através do circuito proposto para o relé de sobrecarga eletrônico, simulações virtuais usando o software de simulação P-Spice foram realizadas para as condições de operação anormais dos motores. Os resultados foram muito satisfatórios e atenderam as exigências para proteção de motores.

Para validar o sistema eletrônico proposto, foi implementado um protótipo do circuito eletrônico de detecção. Alguns testes experimentais adicionais foram realizados e os resultados comparados com as simulações do P-Spice e com as exigências de proteção de motor. Todos os resultados obtidos através dos testes dos protótipos e as simulações do P-Spice permitiram concluir que o sistema eletrônico proposto atende integralmente os requisitos para proteção de motores, isto é, executa proteção efetiva de motores operando sob condições anormais como rotor bloqueado, desbalanceamento e falta de fase e pode ser recomendado para implementação.

Além da proteção efetiva de motores contra condições anormais, o sistema proposto fornece características adicionais de proteção contra desbalanceamento, se comparado com o sistema de bimetais. Melhoras e investigações adicionais podem ser realizadas de forma a ampliar as características de proteção com um novo sistema de medição e/ou atuador usando sistemas microcontrolados.

12 Referência bibliográfica

- [1] AMERICAN NATIONAL STANDARD; “*IEEE Guide for AC Motor Protection*”; ANSI/IEEE C37.96-1988 – New York - USA, June/1989.
- [2] NBR 7094:1996; “*Máquinas Elétricas Girantes – Motores de Indução - Especificação*”; ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas – Rio de Janeiro/SC – Brasil, Fevereiro/2003.
- [3] WEG INDÚSTRIAS S/A; “*Catálogo Geral Motores Elétricos*”; – modelo 050.04- Jaraguá do Sul/SC – Brasil, Maio/2001.
- [4] BRIGHTON, Robert J. and RANADE, Prashant N.; “*Why Overload Relays do Not Always Protect Motors*”; IEEE Transactions on Industry Applications, VOL. IA-18, No. 6, November/1982.
- [5] WOLL, R. F.; “*Effect of Unbalanced Voltage on the Operation of Polyphase Induction Motors*”; IEEE Transactions on Industry Applications, VOL. IA-11, No. 1, January/1975.
- [6] WOLL, R. F.; “*Comparasion of Application Capabilities of U and T Rated Motors*”; IEEE Transactions on Industry Applications, VOL. IA-11, No. 1, January/1975.
- [7] DUNKI-JACOBS, J. R. and KERR, Robert H.; “*A Quantitative Analysis of Grouped Single-Phase Induction Motors*”; IEEE Transactions on Industry Applications, VOL. IA-17, No. 2, March/1981.
- [8] GRIFFITH, M. S.; “*A Penetrating Gaze at One Open Phase: Analyzing the Polyphase Induction Motor Dilemma*”; IEEE Transactions on Industry Applications, VOL. IA-13, No. 6, November/1975.
- [9] CONTIN Mário C. e GRUHL, Elizabeth M.; “*Cálculo de Tempo Permissível por Falta de Fase*”; Trabalho Tecnologia TT-81.029 – WEG Indústrias S/A – Jaraguá do Sul/SC – Brasil, Agosto/1981.
- [10] GRUHL, Elizabeth M.; “*Torques e Correntes no Religamento e Sincronização Fora de Fase de Motores de Indução*”; Trabalho Tecnologia TT-85.008 – WEG Indústrias S/A – Jaraguá do Sul/SC – Brasil, Maio/1985.
- [11] GLEASON, L. L. and ELMORE, W. A.; “*Protection of 3-Phase Motors Against Single-Phase Operation*”; AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, VOL. 77, pt 3, December/1959, pp 1112-1120.
- [12] WILLIAMS, J. E.; “*Operation of 3-Phase Induction Motors on Unbalance Voltage*”; AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, VOL. 73, April/1954, pp 125-133.
- [13] CUMMINGS, P. G.; DUNKI-JACOBS, J. R. and KERR, R. H.; “*Protection of Induction Motors Against Unbalance Voltage Operation*” IEEE Paper No PCI-83-3.

- [14] NAILEN, R. L.; “*Safe locked rotor time – How to safe is it?*” IEEE Trans. Ind. Gen. Appl., vol. IGA-7, pp. 708-712, Nov. 1971.
- [15] REGOTTI, A. A. and RUSSELL, J. D.; “*Thermal limit curves for large squirrel cage induction motors*” IEEE/ASME/ASCE Joint Power Gener. Conf. paper F-76-614-8, 1976.
- [16] SMEATON, R. W.; “*Switchgear and Control Handbook*”; Second Edition; McGraw-Hill; USA; 1987.
- [17] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION; “IEC 85 – Thermal evaluation and classification of electrical insulation”; 2nd edition; Geneva; 1984.
- [18] COWERN, E. H.; “*The Cowern papers – Motor temperature ratings*”; at www.motorsanddrives.com/cowern/motorterms4.html
- [19] COWERN, E. H.; “*Motor temperature ratings*”; at www.baldor.com/pdf/manuals/pr2525.pdf
- [20] BONNETT, A. H.; “*The impact that voltage and frequency variations have on ac induction motor performance and life in accordance with NEMA MG-1 Standards*” Fellow IEEE, U.S. Electrical Motors, Division of Emerson Electric, 1999.
- [21] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION; “*IEC 60034-1 – Rotating electrical machines – Part1: Rating and performance*”. Edition 10.2; Geneva, 1999. 135p.
- [22] NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION; “*NEMA MG1 – Motors and Generators*”; Revision 3,2002 Interfiled. Virgínia, 1998.
- [23] THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC. IEEE Std 118 – “*Standard test code for resistance measurement*”. New York, 1978.
- [24] AEG BROCHURE; “*Low-Voltage Switchgear – Technology, Selection and Application*”; – S4.07.11E/0978, West Germany/1978.

13 Anexo

Constante de tempo térmica para motores elétricos

Carcaça do motor (de acordo com IEC)	Constante de tempo térmica de aquecimento – τ_h (minutos)			
	2 pólos	4 pólos	6 pólos	8 pólos
63	9,36	12,96	14,47	-
71	9,81	14,01	16,34	17,83
80	12,21	14,78	18,19	18,84
90	13,58	16,56	18,73	21,85
100	16,08	17,52	20,03	23,11
112	16,69	18,93	21,97	23,33
132	18,97	20,64	23,71	30,37
160	21,83	23,41	27,99	34,11
180	24,58	25,22	32,27	40,48
200	29,76	30,72	35,01	39,68
225	34,37	33,12	41,11	39,69
250	36,03	34,89	42,65	43,68
280	40,45	39,69	48,51	49,94
315	45,32	43,41	50,26	59,07
355	57,30	56,18	66,26	67,29

(fonte: WEG Motores)